

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ**

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ**

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ**

---

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ВЕСТНИК**

**Выпуск 20**

**СОВРЕМЕННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ**



**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ  
2005**

Выпуск содержит материалы XXXIV научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО, посвященная 100-летию первого выпуска специалистов вуза Конференция была проведена 2–4 февраля 2005 г. Санкт-Петербургским государственным университетом информационных технологий, механики и оптики в сотрудничестве с  
ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова,  
Институтом аналитического приборостроения РАН,  
Институтом проблем машиноведения РАН,  
Комитетом по науке и высшей школе Администрации Санкт-Петербурга,  
ВНИИМ им. Д.И. Менделеева,  
ОАО «ЛОМО»,  
ОАО «Техприбор»,  
ОАО «Электроавтоматика»,  
ЦНИИ «Электроприбор».

#### **Программный комитет конференции:**

Васильев В.Н. (СПбГ ИТМО) – председатель	
Аронов А.М. (ЛОМО)	Маслов Ю.В. (ОАО «Техприбор»)
Викторов А.Д. (КНВШ)	Мирошник И.В. (СПбГУ ИТМО)
Гатчин Ю.А. (СПбГУ ИТМО)	Мусалимов В.М. (СПбГУ ИТМО)
Гуров И.П. (СПбГУ ИТМО)	Парамонов П.П. (ОАО «Электроавтоматика»)
Дукельский К.В. (НИИ ТИОМ)	Пешехонов В.Г. (ЦНИИ «Электроприбор»)
Индейцев Д.А. (ИПМаш РАН)	Путилин Э.С. (СПбГУ ИТМО)
Карасев В.Б. (ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова)	Ханов Н.И. (ВНИИМ им. Д.И. Менделеева)
Козлов С.А. (СПбГУ ИТМО)	Храмов В.Ю. (СПбГУ ИТМО)
Колесников Ю.Л. (СПбГУ ИТМО)	Шехонин А.А. (СПбГУ ИТМО)
Курочкин В.Е. (ИАиП РАН)	Яковлев Е.Б. (СПбГУ ИТМО)

#### **Организационный комитет конференции:**

Никифоров В.О. – председатель	
Студеникин Л.М. – зам. председателя	
Казар Л.Н. – ученый секретарь	
Горкина Н.М.	Прудентова Т.А.
Гусарова Н.Ф.	Савельева Л.П.
Метляков А.П.	Ткалич В.Л.
Подлесных В.И..	Яковлев Е.Б.

ISBN 5-7577-0278-8

© Санкт-Петербургский государственный университет  
информационных технологий, механики и оптики,  
2005

## ОЦЕНКА ПОЗНАВАТЕЛЬНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ ЧЕЛОВЕКА ПО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ

Г.Н. Дульнев, И.В. Дунаевский, И.Б. Стражмейстер

В статье описывается исследование степени хаотичности энергоинформационного потока сознания человека по определенному способу их оценки и приводятся результаты опытов со студентами различной успеваемости и оценка их способности сосредотачиваться на лекционном материале, а также реагировать на внешнее воздействие, дистанционно произведенное И.В. Дунаевским из другой удаленной аудитории. Оценка степени сосредоточенности студентов производилась с помощью термодинамического показателя локальной энтропии обмена с окружающей средой.

### Введение

Степень хаотичности или упорядоченности принято в физике оценивать величиной энтропии. При изучении этого процесса в сознании человека речь может идти о величине значения удельной термодинамической (или информационной) энтропии с различных участков тела человека в различные моменты времени. Термодинамические открытые системы обмениваются с внешней средой массой, энергией и информацией, т.е. происходит массоэнергоинформационный обмен, который иногда коротко называют энергоинформационным. Он может быть представлен как локальный поток энтропии обмена, способ измерения которой при эндогенных (внутренних) и экзогенных (внешних) воздействиях рассмотрен в статье [1]. Базируясь на этой статье, приведем результаты исследований студентов различной успеваемости и оценки их способности сосредотачиваться на лекционном материале, а также реагировать на внешнее дистанционное воздействие, которые позволяют показать возможности использования этого способа для оценки познавательных способностей человека.

В Центре энергоинформационных технологий (ЦЭИТ) при кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга (КТФиЭМ) производится разработка способа оценки состояния сознания человека по изменению относительной нормированной энтропии в результате внешнего воздействия, которое рассматривается с позиции «энергоинформации», т.е. взаимодействия человека с окружающим пространством и другим человеком.

13.10.04 была проведена оценка изменений нормированной относительной энтропии с участием пяти студентов при экзогенном (внешнем) воздействии на их сознание.

Воздействие заключалось в прослушивании лекции по астрономии капитана I ранга, кандидата технических наук, начальника кафедры тактики С.А. Сударчикова на кафедре мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций. В некоторый момент времени, с 50-й по 60-ю минуту чтения лекции, индуктор-человек И.В. Дунаевский осуществлял дистанционное воздействие из лаборатории ЦЭИТ (кафедра КТФиЭМ) в аудиторию, где шла лекция. Эти два помещения находятся на разных этажах на расстоянии примерно 200 м и отделены друг от друга многочисленными стенками. Передача телепатического сигнала осуществлялась в течение 10 минут – 5 минут успокаивающее и 5 минут возбуждающее воздействие.

Критерием подбора перципиентов являлась их успеваемость, которая распределялась примерно следующим образом: отличница; между четверкой и пятеркой; между тройкой и четверкой; между двойкой и тройкой; кандидат на отчисление.

Метод измерения, применяемые в этом опыте приборы и обработка результатов приведены в статье [1]. Результаты опыта представлены графически. Датчики теплового

го потока и температуры крепились в середине лба (по восточной терминологии – на трикуте) у студентов. У индуктора-человека И.В.Дунаевского было задействовано два датчика, крепились они также на лбу на соответствующих точках левого и правого полушария.

Эксперимент начался в 12. 46 (время начала лекции). Индуктор-человек находился в другом помещении и начал воздействовать спустя 46 минут.

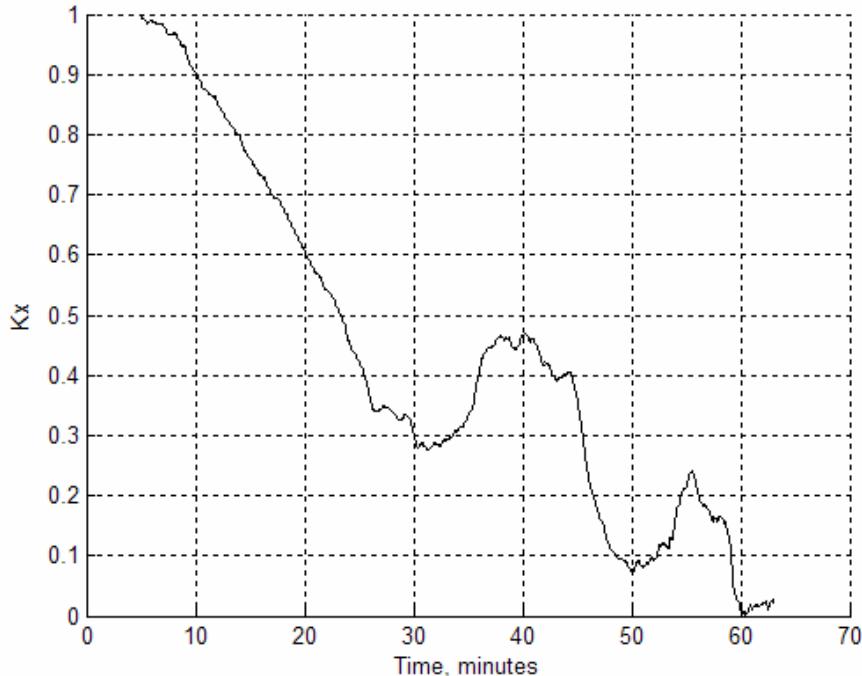


Рис. 1. Временная динамика коэффициента хаоса (отличница, студентка М.С.)

На рис. 1 (отличница, студентка М.С.) до 30 минуты идет падение коэффициента хаоса  $K_x$ , т.е. упорядочение внутреннего состояния перципиента. Она поглощена лекцией, никакие внешние факторы (смех, разговоры соседей) не отвлекают ее. С 35 по 45 минуту происходит подъем коэффициента хаоса  $K_x$ . Можно предположить, что это вызвано переходом преподавателя ко второй части лекции (с 38 по 42 минуту). Затем опять наблюдается падение коэффициента хаоса  $K_x$  до 50 минуты. Во время дистанционного воздействия с 50 по 60 минуту, первые 5 минут наблюдается подъем коэффициента хаоса  $K_x$  на 12 %. Ко времени окончания эксперимента коэффициента хаоса  $K_x$  приходит в ноль, т.е. внутреннее состояние упорядочивается полностью.

На рис. 2 (между четверкой и пятеркой, студент О.Я.) до 20 минуты идет падение коэффициента хаоса  $K_x$ , с 20 по 30 минуту небольшой подъем. Возможно, это происходит потому, что он в это время не сосредоточен на занятии (новый заголовок, преподаватель отвлекается от основной темы, смех). Затем коэффициент хаоса  $K_x$  опять падает до 40 минуты. Примерно с 42 минуты он периодически разговаривает с соседями, и так до 49 минуты (подъем коэффициента хаоса  $K_x$ ). С 50 по 60 минуту идет неконтактное воздействие индуктора, коэффициент хаоса  $K_x$  возрастает на 50% и доходит до 1 (максимума) – полный хаос. Также как на рис. 1, по окончании лекции коэффициент хаоса  $K_x$  приходит в ноль (минимум), внутреннее состояние упорядочивается полностью.

На рис. 3 (тройка–четверка, студент А.К.) наблюдается колебательный процесс, коэффициент хаоса  $K_x$  растет. Студент периодически разговаривает, смеется, он отвлечен. Судя по графику, лекция его раздражает. На 46 минуте преподаватель задает вопрос, спрашивает этого студента, затем он сам задает вопрос преподавателю, идет сосредоточение на теме, что можно наблюдать на графике (падение коэффициента хаоса

$K_x$ ). С 50 по 60 минуту, во время воздействия индуктора, коэффициент хаоса  $K_x$  возрастает на 32 % и доходит до 1 (максимума) – полный хаос. Также как на рис. 1, по окончании лекции коэффициент хаоса  $K_x$  приходит в ноль (минимум), внутреннее состояние упорядочивается полностью.

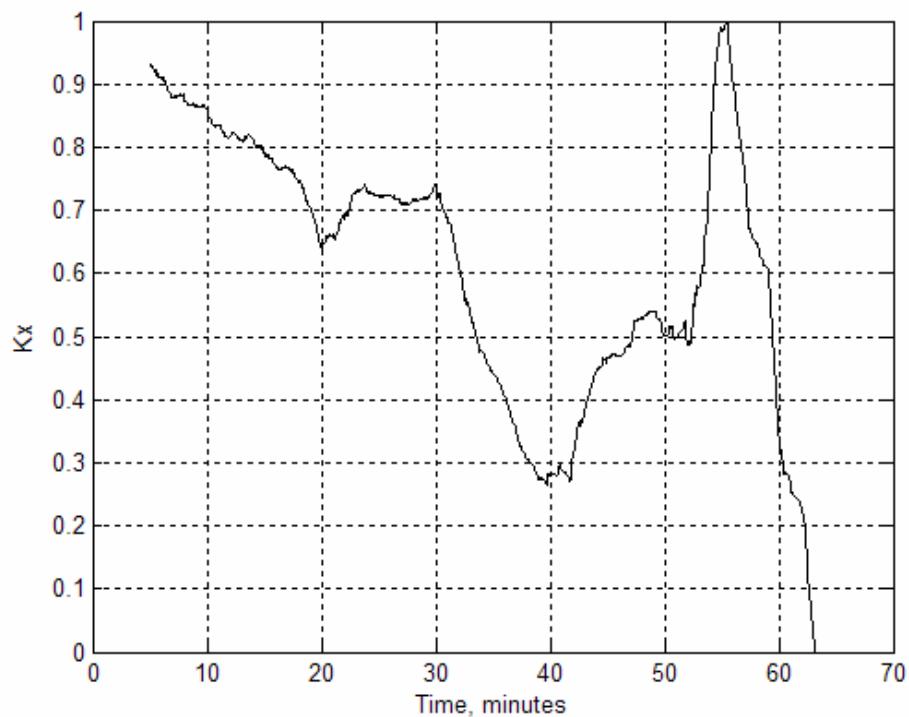


Рис. 2. Временная динамика коэффициента хаоса (между четверкой и пятеркой, студент О.Я.)

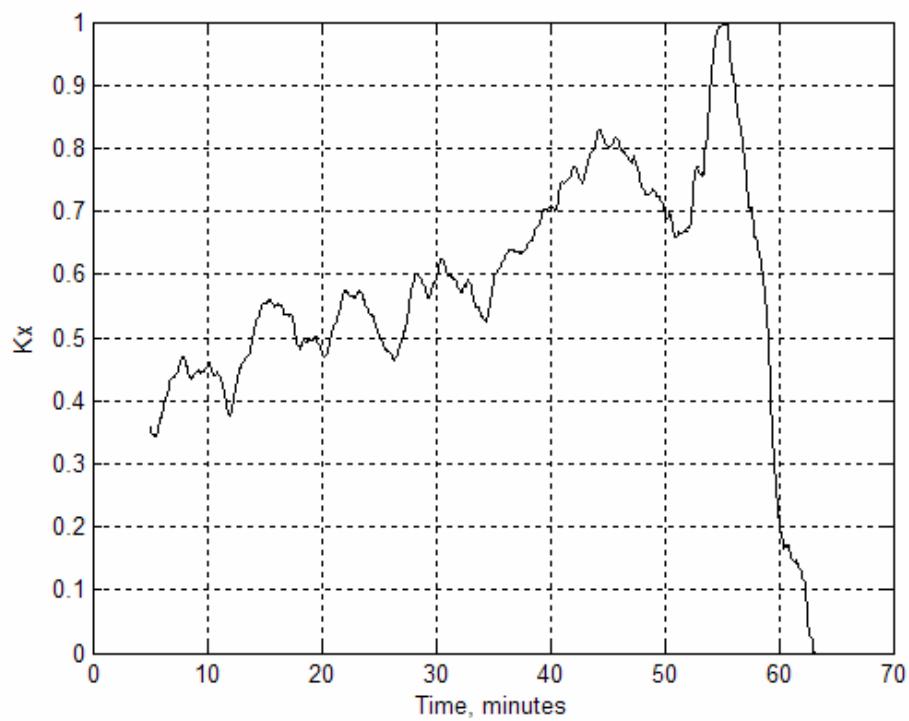


Рис. 3. Временная динамика коэффициента хаоса (между тройкой и четверкой, студент А.К.)

На рис. 4 (двойка–тройка, студент А.С.) коэффициент хаоса  $K_x$  падает до 20 минуты более круто, чем с 20 по 50. Этот интервал времени он посвятил разговорам, был полностью отвлечен от лекции, до 20 минуты он не разговаривал, возможно, слушал лекцию. С 50 по 60 минуту во время воздействия индуктора коэффициент хаоса  $K_x$  возрастает на 37 % и доходит до максимума – полный хаос. Также как и на рис. 1, по окончании лекции коэффициент хаоса  $K_x$  приходит в нуль (минимум), внутреннее состояние упорядочивается полностью.

Рис. 5 соответствует студенту А.М. с успеваемостью два. Его внутреннее состояние полностью упорядочено в начале лекции, коэффициент хаоса  $K_x$  находится в нуле. До 50 минуты коэффициент хаоса  $K_x$  возрастает, но примерно с 16 по 22 минуту наблюдается падение, эти 6 минут студент увлечен лекцией, хотя в это время преподаватель отвлекается от темы, в аудитории смех, сам студент разговаривает. С 40 по 43 минуту студент разговаривает с соседом, с 40 по 50 минуту коэффициент хаоса  $K_x$  колеблется от 80% до 100%. Во время воздействия  $K_x$  уменьшается и доходит до 30%, после чего слегка поднимается в процессе последействия.

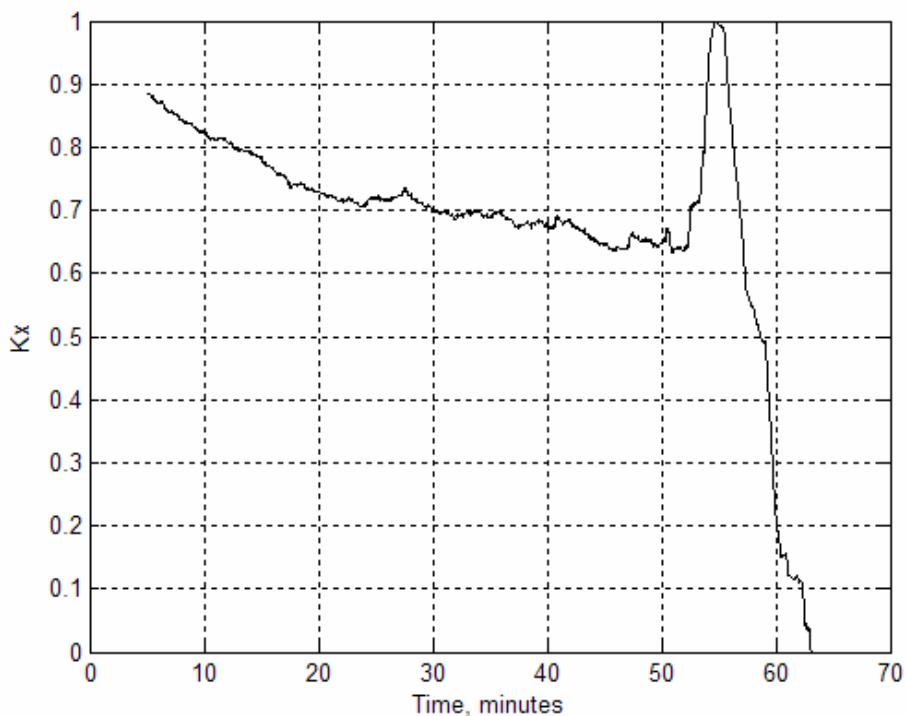


Рис. 4. Временная динамика коэффициента хаоса (между двойкой и тройкой, студент А.С.)

Рис. 6 соответствует индуктору Илье Дунаевскому. Первые 5 минут, с 45 по 50 минуту проведения опыта, записывается фон: правое и левое полушария десинхронизированы, коэффициент хаоса  $K_x$  левого полушария доходит до максимума к началу воздействия, осуществляется логическое продумывание эксперимента. С 50 по 55 минуту производится успокаивающее воздействие: коэффициент хаоса  $K_x$  правого полушария опускается до минимума, происходит полное упорядочение эмоциональной сферы; коэффициент хаоса  $K_x$  левого полушария опускается до 22%. С 55 по 60 минуту производится возбуждающее воздействие: коэффициент хаоса  $K_x$  правого и левого полушарий доходят до максимума, причем правое полушарие опережает по фазе левое. С 60 по 70 минуту записывается последействие: коэффициент хаоса  $K_x$  правого и левого полушарий опускаются, на 66 минуте коэффициент хаоса  $K_x$  левого полушария доходит до 0, а правого до 5%, логическая сфера упорядочивается полностью, после чего оба показателя стремятся к 33% – показатель гармонизации.

На основе проведенного эксперимента можно сделать следующие выводы:

Воздействие И.В. Дунаевского было зарегистрировано у всех студентов. Реакция студента с успеваемостью «отлично» – самая низкая, всего 12%. У студента с самой низкой успеваемостью это воздействие вызвало понижение нормированной относительной энтропии до 30%. У всех остальных перципиентов коэффициент хаоса  $K_x$  достиг максимального значения, равного единице.

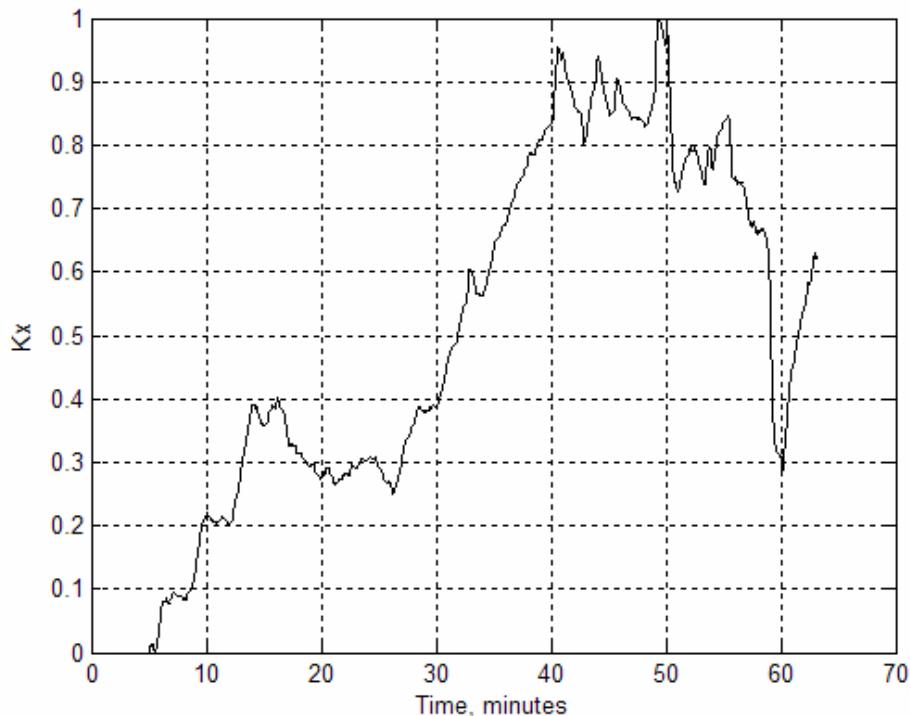


Рис. 5. Временная динамика коэффициента хаоса (кандидат на отчисление, студент А.М.)

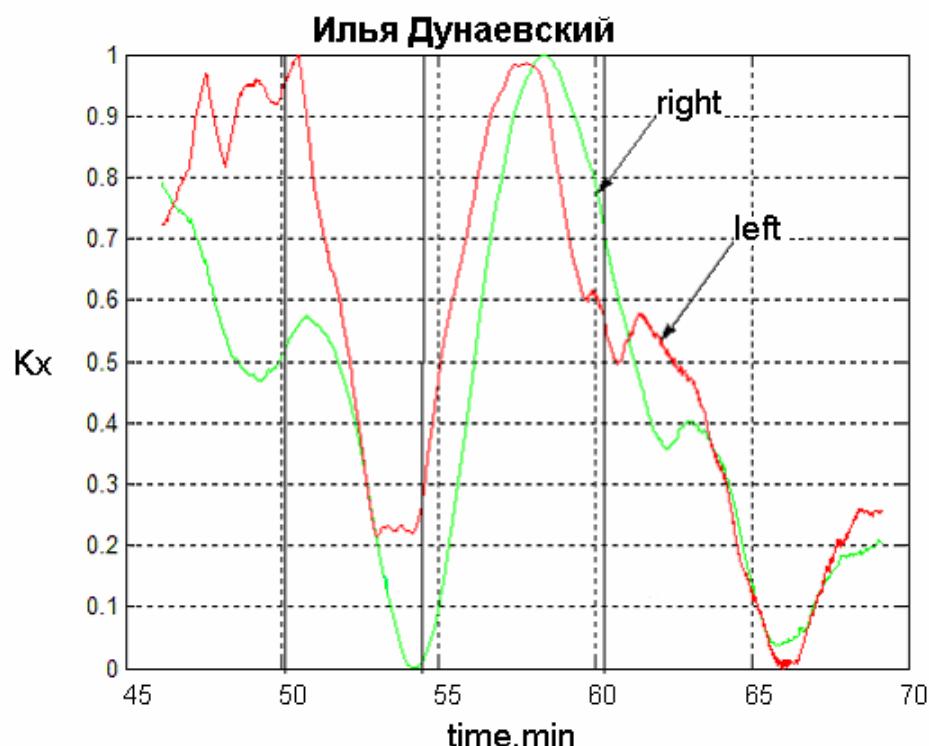


Рис. 5. Временная динамика коэффициента хаоса (индуктор)

Первые 5 минут воздействие индуктора было успокаивающее ( $K_x$  понижался), а вторые 5 минут – воздействие стимулирующее ( $K_x$  возрастал). У студентов реакция была обратной: сначала коэффициент хаоса  $K_x$  возрастал, а затем уменьшался. На самого индуктора процесс воздействия оказывает гармонизирующее влияние.

У четверых студентов по окончании лекции состояние сознания упорядочивается, у студента с низкой успеваемостью коэффициент хаоса  $K_x$  возрастает.

### **Заключение**

Серия данных экспериментов доказывает возможность использования способа оценки состояния сознания человека по изменению относительной нормированной энтропии в педагогике для косвенного определения степени сосредоточения студентов на лекционном материале и прогноза их успеваемости.

Кроме того, зарегистрировано дистанционное телепатическое воздействие И.В. Дунаевского на студентов во время прослушивания ими лекции, при этом характер воздействия коррелирован со степенью восприимчивости студентов в соответствии с их успеваемостью.

### **Литература**

1. Дульнев Г.Н., Стражмейстер И.Б. Способ оценки степени хаотичности энергоинформационных потоков в сознании человека. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2005. № 18. С. 59–62

**СОСТАВ И СТРУКТУРА ЭЛЕКТРОННОГО  
УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА  
ДЛЯ ДИСЦИПЛИНЫ «КОНЦЕПЦИИ СОВРЕМЕННОГО  
ЕСТЕСТВОЗНАНИЯ»  
С.М. Вергезова, Е.А. Сергеева**

В центре дистанционного обучения (ЦДО) СПбГУ ИТМО проводится работа по созданию электронных учебно-методических комплексов (УМК) по многим учебным дисциплинам. В сетевой технологии могут быть реализованы различные способы и методы обучения: электронные учебники с удаленным доступом, виртуальные лаборатории, электронные практикумы, электронные библиотеки, телеконференции студентов и преподавателей, тестирующие обучающие и аттестующие системы. Система дистанционного обучения Центра выгодно отличается от всех существующих за счет открытости и универсальности, позволяющих реализовать неограниченные возможности в области разработки и развития электронных учебно-методических материалов по любым дисциплинам с использованием открытых форматов.

Огромную роль в правильной организации работы студента с наполнением УМК способна сыграть концепция открытых стандартов и идея разделения содержания материала и формы его представления. В СДО СПбГУ ИТМО имеется базовый набор учебных объектов, таких как электронные конспекты, аттестующие и обучающие тесты, электронные практикумы, виртуальные лабораторные работы, информационные ресурсы, из которых составляется индивидуальный учебно-методический комплекс. В качестве языка метаописания набора учебных объектов используются расширяемые языки разметки (extensible markup languages, XML).

Электронный УМК, проектируемый в ЦДО СПбГУ ИТМО, включает в себя следующие компоненты:

1. блок нормативных документов (государственный образовательный стандарт и рабочая программа дисциплины);
2. руководство по изучению дисциплины;
3. содержание учебной дисциплины;
4. инструкции пользователю (студенту);
5. учетно-статистическая документация (электронный журнал);
6. тесты (обучающие и контролирующие/аттестующие).

В руководство по изучению дисциплины входят следующие подразделы [1]:

- цели и задачи дисциплины;
- методические рекомендации по изучению дисциплины;
- темы рефератов, сочинений, курсовых работ;
- формы контроля;
- вопросы итогового контроля по дисциплине;
- глоссарий, словарь происхождения иностранных слов, именной указатель, предметный указатель;
- библиографический список и список Интернет-ресурсов по дисциплине.

Можно и нужно более широко использовать возможности поиска информации в Интернете. Использование Интернет-ресурсов позволит значительно разнообразить задания для студентов, например [2]:

- написание и защита рефератов разных видов на основе материалов из сети;
- анализ существующих в сети материалов на данную тему, их оценивание;
- составление коллекции аннотированных ссылок Интернета по теме;
- рецензия на сайт или сравнение нескольких сайтов по изучаемой теме, его последующая презентация;

- сбор мультимедиа-материала к заданной теме (текст, иллюстрации, анимации, аудио и видеофрагменты);
  - иллюстрация найденного текста своими мультимедиа-материалами (графика, схемы, таблицы и т.д.)

**Содержание учебной дисциплины** оформлено в виде гипертекстовых лекций (электронный учебник), которые содержат в себе ссылки на глоссарий (рис. 1), словарь иностранных слов, именной указатель. Также предусмотрен более краткий вариант – конспект лекций (в виде презентаций Microsoft PowerPoint) и аннотации.

Пример метаописания ссылки на глоссарий:

<p align="justify"> <a href = "dlc://FrameIndex(401, TextBook, 21001110)"><i>Кибернетика</i> </a> рассматривает не изолированные системы, а системы, взаимодействующие друг с другом.</p>

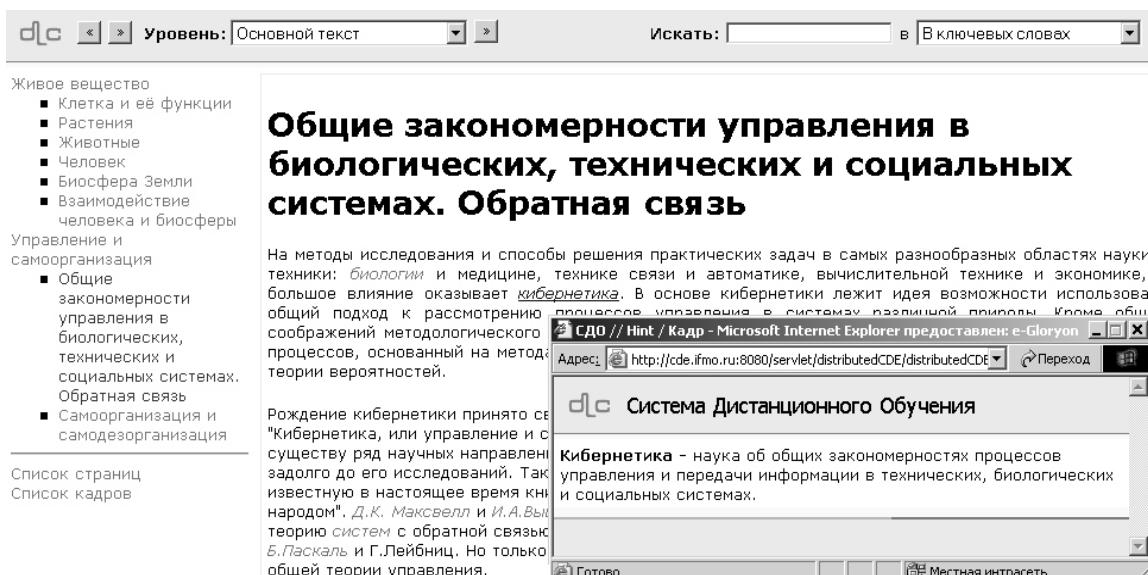


Рис.1. Пример ссылки на глоссарий

Пример метаописания глоссария (подробнее см. [3]):

<FrameIndex Scheme="401" FrameID="21001110">

<TextBookFrame Name="Кибернетика" Status="Определение">

<Data>

Лекция 1

## • Контроль передачи информации

первой и информации о технических, биологических и социальных системах. >  
</Data>

</TeX>

</FrameIndex>

## Мультимедийн

ал до студента, а размещение конспектов лекционного материала на интернет-сайтах и его раздача непосредственно перед лекцией позволяет студенту активизировать свою работу на лекции, внимательнее слушать лектора, не отвлекаясь на конспектирование, а только делая заметки по ходу лекции. В Интернете лектор может поместить краткий конспект лекции, который студент может распечатать перед лекцией, а по ходу лекции делать необходимые заметки, конспектировать материал. Такой подход удобен, когда лекции читаются традиционным способом, без использования мультимедийных средств. Еще более широкие возможности появляются, если для чтения лекция готовится в виде презентации.

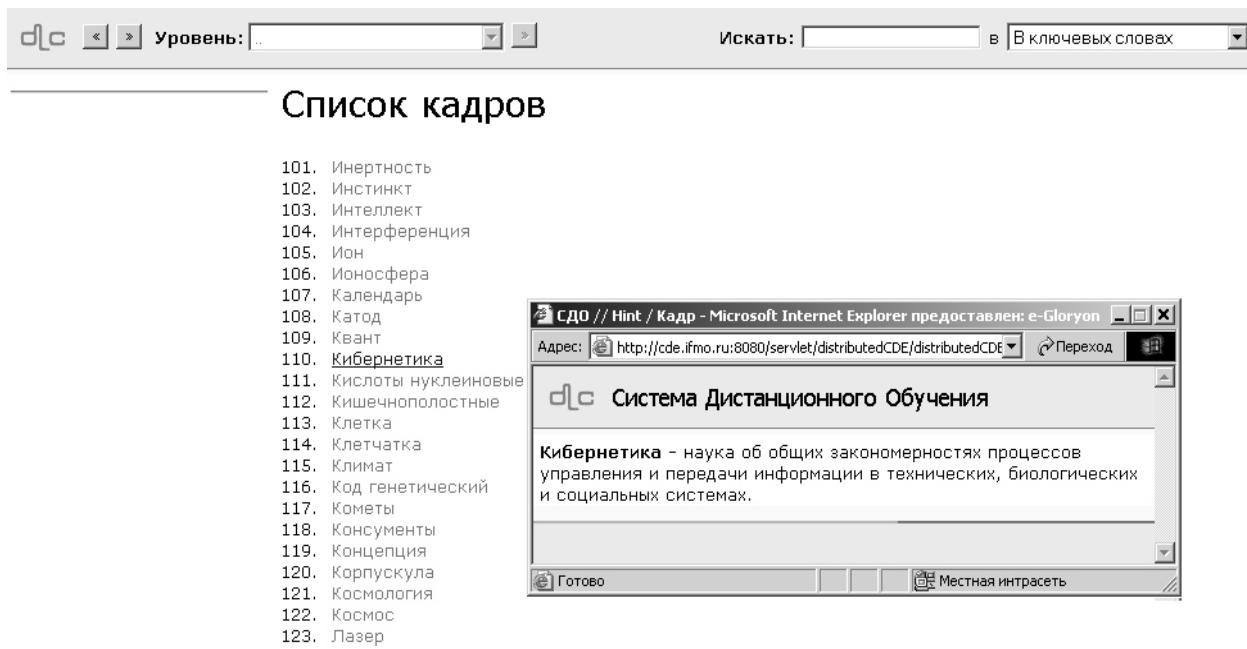


Рис. 2. Пример реализации глоссария

Опыт показывает, что чтение лекций с использованием мультимедийных средств позволяет улучшить усвоение материала студентами, а заинтересованным студентам позволяет расширить свои знания. Особенность заключается в том, что одновременно с чтением лекции демонстрационный материал в формате презентация PowerPoint помещается на Интернет-сайт. Для каждой лекции создается специальная страничка, которая, кроме демонстрационного материала, содержит дополнительный материал по теме лекций. В качестве дополнительных материалов предлагаются статьи по данной тематике, ссылки на литературу и сайты Интернета, просто текстовая информация.

Основу системы дистанционного обучения составляет база данных, предназначенная для хранения информационно-обучающих объектов, результатов аттестации знаний, информации о пользователях и их правах.

**Учетно-статистическая документация (электронный журнал)** включает:

- данные о студенте, пароль доступа;
  - результаты выполнения тестов.
- Это позволяет преподавателю:
- иметь доступ к базе данных оценок за тесты,
  - осуществлять подробный просмотр ответов студентов,
  - анализировать тенденции улучшения или ухудшения успеваемости,
  - контролировать учебный процесс.

В системе реализованы **тесты** двух видов.

- Обучающие тесты (тесты самоконтроля знаний), которые содержат примеры типовых заданий по каждой теме. Неверные ответы сопровождаются комментариями, объяснениями правильных ответов или ссылкой на страницы электронного учебника, где изложена необходимая информация.
- Контролирующие (аттестующие) тесты – после каждого раздела учебника и итоговый – по всему курсу.

Одной из дисциплин, по которой в ЦДО СПбГУ ИТМО создается УМК, является дисциплина «Концепции современного естествознания».

Согласно государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования, дисциплина «Концепции современного естествознания» вклю-

чена в обязательный минимум содержания профессиональных образовательных программ более чем по 25 направлениям и специальностям. К их числу относятся, прежде всего, гуманитарные и педагогические области образования. В частности, эта дисциплина включена и в учебный план специальности 030500 «Профессиональное обучение (дизайн)». Имеется примерная программа этой дисциплины, утвержденная Минобразованием России. В настоящее время по дисциплине издано более 70 учебников и учебных пособий, на Интернет-сайтах размещено более 10 учебников.

Для определения путей совершенствования преподавания дисциплины «Концепции современного естествознания» было проанализировано более 50 печатных учебных изданий и несколько электронных учебников (на основе требований из [4]). Из проанализированных учебников и учебных пособий только 13% содержат методические указания и рекомендации по изучению материала для студентов. В изданиях редко присутствуют цели и задачи, план учебного курса. Главное – не обнаружено ни одного полноценного электронного учебно-методического комплекса (УМК), т.е. учебного издания, представляющего собой совокупность учебных и учебно-методических материалов для изучения студентами дисциплины. Между тем большое значение имеют рекомендации студентам по самостоятельному овладению предметом. Поэтому актуальной задачей становится создание учебно-методических комплексов, основанных на сетевой Интернет-технологии по дисциплине.

Структура электронного УМК по дисциплине «Концепции современного естествознания» включает в себя следующие учебные объекты (рис. 3): электронные конспекты и обучающие и аттестующие тесты к ним, различные приложения, реализованные в форме информационных ресурсов.

Пример метаописания набора учебных объектов в структуре курса:

*<Structure>*

...

*<Unit UnitID="5" Name="Живое вещество. Управление и самоорганизация">*

*<Unit UnitID="6" Name="Конспект"/>*

*<Unit UnitID="7" Name="Обучающий тест"/>*

*<Unit UnitID="8" Name="Аттестующий тест"/>*

*</Unit>*

...

*<Unit UnitID="12" Name="Глоссарий"/>*

*<Unit UnitID="13" Name="Персоналии"/>*

*<Unit UnitID="14" Name="Приложения">*

*<Unit UnitID="15" Name="Прогулка по Интернет"/>*

*<Unit UnitID="16" Name="Конспект лекций"/>*

*<Unit UnitID="17" Name="Список литературы"/>*

*<Unit UnitID="18" Name="Демонстрации"/>*

*<Unit UnitID="19" Name="Вопросы для повторения"/>*

*<Unit UnitID="20" Name="Темы рефератов"/>*

*</Unit>*

*</Structure>*

По всем разделам дисциплины проводится тестирование. Каждый тест состоит из десяти заданий закрытого типа, общее число заданий превышает 350. В дальнейшем планируется расширить банк заданий и добавить задания других типов. После проведения каждого цикла тестирования проводится статистическая обработка его результатов (рис. 4). Результаты обработки оперативно передаются преподавателям, руководству соответствующих факультетов, авторам компьютерных тестов, используются для определения успешности освоения студентами конкретных тем. По результатам статистической обработки оценивается и качество самих тестов, в частности, их надежность.



## Обучение и аттестация

- Учебный план
- [Концепции современного естествознания](#)
- 1 семестр

## Содержание электронного курса

- Материя. Земля и Солнечная система
  - Конспект
  - Обучающий тест
  - Аттестующий тест
- Живое вещество. Управление и самоорганизация
  - Конспект
  - Обучающий тест
  - Аттестующий тест
- Итоговый тест
  - Обучающий тест
  - Аттестующий тест
- Глоссарий
- Персоналии
- Приложения
  - Прогулка по Интернет
  - Конспект лекций
  - Список литературы
  - Вопросы для повторения
  - Темы рефератов

Рис. 3. Набор учебных объектов в структуре курса

Группы	Состав
1050	Бакеева Татьяна Сергеевна
1051	Брутман Георгий Евгеньевич
1052	Быкова Александра Андреевна
1060	Васильев Виталий Андреевич
1070	Васильева Наталья Вячеславовна
1071	Вахугова Анастасия Владимировна
1072	Гончарова Полина Игоревна
1080	Гусев Никита Максимович
1081	Дроздов Дмитрий Анатольевич
1100	Евлампиев Александр Владимирович
1101	Зозуленко Станислав Валентинович
1102	Киреева Ирина Эриковна
1103	Колб Евгений Сергеевич
1107	Коньков Евгений Владимирович

Дисциплины	Сценарии
Английский язык - Исходные знания (удовл)	Живое вещество. Управление и самоорганизация (08.12.2004) (удовл)
Математический анализ (I семестр) (...)	Живое вещество. Управление и самоорганизация (15.12.2004) (хор)
Линейная алгебра ('B')	Живое вещество. Управление и самоорганизация (15.12.2004) (хор)
Концепции современного естествознания ('D')	Итоговый (15.12.2004) (хор)
Английский язык. I курс ('E')	Материя. Земля и Солнечная система (06.10.2004) (удовл)
Основы логической культуры ('C')	Материя. Земля и Солнечная система (13.10.2004) (отл)

Рис. 4. Пример журнала статистики

В будущем планируется дополнить УМК **мультимедийными обучающими средствами** – учебными и демонстрационными клипами, графикой, анимацией (демонстрации различных процессов и явлений), интерактивной flash-анимацией (виртуальный лабораторный практикум).

Все это позволит использовать УМК как для очного, так и для заочного и дистанционного обучения. Таким образом, система ДО СПбГУ ИТМО будет использоваться не только и не столько как средство получения образования дистанционным способом, сколько как компьютерная технология обучения по любой форме образования – очной,

вечерней, заочной и экстерната, направленная на активизацию самостоятельной работы студентов по изучению дисциплины и повышение качества и объективности процесса аттестации.

### **Литература**

1. Захарова И.Г. Информационные технологии в образовании: Учеб. пособие для студ. высш. пед. учеб. заведений. М.: Издательский центр «Академия», 2003. 192 с.
2. Моисеева М.В., Полат Е.С., Бухаркина М.Ю., Нежурина М.И. Интернет-обучение: технологии педагогического дизайна. М.: Издательский дом «Камерон», 2004. 216 с.
3. Техническое руководство по разработке учебно-методического комплекса для системы дистанционного обучения / <http://cde.ifmo.ru/index.php?node=10>.
4. Антонова С.Г., Тюрина Л.Г. Теория и проблемы создания учебной литературы нового поколения. М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 2002. 76 с.

# **ВОСПИТАНИЕ КОМАНДИРСКИХ КАЧЕСТВ КАК СОСТАВНАЯ ЧАСТЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПЕДАГОГИЧЕСКОГО МЫШЛЕНИЯ У БУДУЩИХ ПЕДАГОГОВ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБУЧЕНИЯ**

**И.Н. Хромов**

В статье рассматриваются методические приемы, позволяющие в процессе военной подготовки формировать у будущих педагогов профессионального обучения педагогическое мышление.

В современных условиях в системе образования осуществляется переход на новые ценности и новое понимание смысла развития, воспитания и психологической поддержки личности. Правомерно вести речь и о совершенствовании педагогического процесса и современного педагогического мышления. Ведь глубинной сутью, главной задачей педагогической деятельности является возвышение человека, утверждение и развитие всего лучшего, что заложено в нем, т.е. индивидуальных качеств, освоение индивидуумом норм общественной морали, культивирование внутренней свободы и творчества. Практика показывает, что этот процесс является сложным, противоречивым и неравномерным. Формируется новая культура воспитания, открывающая выход воспитания на гуманистическую модель, освоение демократических способов организации жизни в образовательных учреждениях всех типов, видов и категорий, а также в армии и на флоте [1].

Наряду с важностью всех направлений воспитания для всех граждан Российской Федерации возрастает его роль в воспитании воспитателей, т.е. будущих руководителей предприятий, организаций и даже государств, но особенно это актуально для формирования педагогического мышления будущих педагогов и офицеров-воспитателей. Формирование педагогического мышления у педагогов профессионального обучения в области компьютерных технологий в ходе военной подготовки студентов имеет свои особенности. Прежде всего, утверждать новое педагогическое мышление – значит, учитывать свойства самого мыслительного процесса, его возможности. Важно в рамках нового педагогического мышления мобилизовать интеллект на продуктивный поиск эффективных путей повышения результативности и качества учебно-воспитательного процесса.

Концепция поддержания обороноспособности нашей страны в современных условиях предусматривает комплектование до половины первичных офицерских должностей в Вооруженных Силах Российской Федерации офицерами, прошедшиими военное обучение по программам подготовки офицеров запаса в гражданских образовательных учреждениях высшего профессионального образования. Из этого вытекает задача повышения качества подготовки офицеров запаса на военных кафедрах вузов. Образование, включающее обучение и воспитание специалистов, предусматривает привитие им всех профессионально значимых качеств необходимых не только современному руководителю предприятия, организации и т.д., но и офицеру-воспитателю.

Основными направлениями воспитания студентов как будущих педагогов и офицеров в современных условиях являются следующие: государственно-патриотическое; профессиональное (военно-профессиональное); духовно-нравственное; социально-правовое; экологическое; физическое [2].

Важнейшей формой воспитания командирских качеств будущих педагогов и офицеров является самовоспитание. Педагогический анализ процесса самовоспитания студентов позволяет говорить о ряде логически взаимосвязанных и взаимообусловленных этапов работы человека над собой. Подробнее об этом говорилось ранее [3].

Начальным этапом в самовоспитании выступает самопознание. Самопознание представляет собой сложный процесс определения своих способностей и возможно-

стей, уровня развития требуемых качеств личности. Методически правильно организованное самопознание осуществляется по трем направлениям – самосознание себя, самоизучение, самооценка [4].

Самосознание позволяет студенту, проходящему военное обучение по программам подготовки офицеров запаса, глубже осознать и уяснить систему требований, предъявляемых к нему не только как к будущему специалисту конкретной воинской специальности, но и как к будущему офицеру-воспитателю, понять свои задачи и представить перспективу своего дальнейшего развития.

Практика убеждает: уровень педагогического мастерства офицеров самым непосредственным образом влияет на качество обучения и воспитания студентов, высокие результаты в военном обучении по программам подготовки офицеров запаса.

Исходя из квалификационных требований, выпускник военной кафедры гражданского учебного заведения профессионального образования – офицер запаса должен:

- обладать развитым абстрактно-логическим мышлением, собственным компетентным мнением, уметь принимать обоснованные решения в нестандартных условиях обстановки и организовывать их выполнение;
- знать требования к организации боевой подготовки в армии и на флоте, уметь планировать мероприятия по поддержанию и совершенствованию боевой и мобилизационной готовности, проводить учения, учебные занятия и тренировки по боевой подготовке;
- знать психолого-педагогические основы управленческой деятельности, уметь воспитывать подчиненных, поддерживать крепкую воинскую дисциплину и высокое морально-психологическое состояние личного состава, обеспечивать безопасные условия служебной деятельности;
- обладать культурой межнационального общения, уметь сплачивать личный состав, укреплять дружбу между воинами различных национальностей, обеспечивать учет и уважение их национальных чувств, традиций и обычаев;
- обладать твердой и непреклонной волей, уметь контролировать свои эмоции и чувства и волю других;
- иметь развитое чувство собственного достоинства, уметь постоять за себя, защищать свое личное достоинство и уважать достоинство других;
- уметь видеть главное в работе, четко определять цели и проявлять настойчивость в их достижении, осуществлять подбор исполнителей и рационально распределять обязанности между ними, доводить начатое дело до конца, контролировать исполнение приказов и распоряжений подчиненными;
- знать основы работы с людьми, проявлять чуткость и внимательность к подчиненным, сочетать высокую требовательность и принципиальность с уважением их личного достоинства;
- знать и точно соблюдать правила и положения, установленные воинскими уставами, законами, иметь образцовый внешний вид и строевую подтянутость;
- владеть компьютерными технологиями сбора, хранения, обработки и использования информации;
- обладать стремлением к самосовершенствованию, уметь планировать профессиональную карьеру, профессиональное и личностное саморазвитие, приобретать новые знания и использовать для этого современные информационные образовательные технологии;
- обладать верой в себя, в свои силы и способности, в свое призвание, в правильность выбора жизненного пути, в успех;

- знать и неукоснительно соблюдать правила воинского этикета, проявлять вежливость и тактичность в отношении со старшими командирами и начальниками, товарищами по службе и подчиненными;
- быть честным и порядочным, сохранять незыблемую верность слову, единству слова и дела [5].

Все эти качества – знания, навыки и умения – правомочно определить под единым термином – командирские качества.

Рассмотрим, каким же образом и благодаря каким методическим приемам, применяемым во время обучения по программам подготовки офицеров запаса на военных кафедрах, осуществляется формирование педагогического мышления у будущих педагогов профессионального обучения.

Прежде всего, *педагогическое мышление* есть определенное видение и понимание учителем ученика, самого себя, окружающего мира, выступающее основанием для вычленения и решения задач в педагогическом взаимодействии. В свою очередь, *практическое педагогическое мышление* – это анализ конкретных педагогических ситуаций с использованием теоретических закономерностей развития педагогического взаимодействия и принятие на основе этого реального педагогического решения, которое воплощается [6].

Таким образом, рассмотрев исследуемую проблему, можно выдвинуть гипотезу: военная подготовка способна существенно влиять на формирование будущих педагогов, на их психологическую адаптацию к профессиональной деятельности, на формирование у них педагогического мышления.

Это обусловлено тем, что, согласно государственным образовательным стандартам высшего профессионального образования, военная подготовка проводится в объеме 450 академических часов и 225 часов самостоятельной работы студентов за время обучения в вузе. Кроме этого, студенты проходят дополнительную практику в период проведения учебных военных сборов в воинских частях и на кораблях, на которую отводятся 144 часа аудиторного времени и 71 час самостоятельной работы студентов. Общая трудоемкость военного обучения по программам подготовки офицеров запаса – 1008 часов, что составляет, как правило, свыше 10% общего объема часов освоения основной образовательной программы.

Рассмотрим пути достижения поставленных перед нами целей и применяемые при этом методические приемы.

Обладание развитым абстрактно-логическим мышлением, собственным компетентным мнением достигается высоким уровнем подготовки по дисциплинам, составляющим общефедеральный компонент ГОС ВПО.

Умение принимать обоснованные решения в нестандартных условиях обстановки и организовывать их выполнение, прививаемое на военной кафедре, позволяет будущему педагогу более уверенно строить учебно-воспитательный процесс и в учебном заведении. Умение базируется на полученной в вузе педагогической практике и совершенствуется во время военного обучения.

Знание требований к организации боевой подготовки в армии и на флоте, умение планировать мероприятия по поддержанию и совершенствованию боевой и мобилизационной готовности, проводить учения, учебные занятия и тренировки по боевой подготовке – это только разновидность педагогической практики, привязанная к военно-профессиональному обучению, позволяющая шире представлять диапазон конкретных педагогических ситуаций, которая достигается благодаря глубокому изучению руководящих документов и отработки навыков в учебные часы.

Знание психолого-педагогических основ управлеченческой деятельности, умение воспитывать подчиненных, поддерживать крепкую воинскую дисциплину и высокое морально-психологическое состояние личного состава, обеспечивать безопасные усло-

вия служебной деятельности – эти качества, заложенные в часы профессиональной подготовки, совершенствуются благодаря глубокому изучению правовых документов в курсах общественно-государственной подготовки и воинских уставов, регламентирующих повседневную деятельность личного состава.

Обладание культурой межнационального общения, умение сплачивать личный состав, укреплять дружбу между воинами различных национальностей, обеспечивать учет и уважение их национальных чувств, традиций и обычаев, как нигде, необходимы в Вооруженных Силах. Данный фактор значительно влияет на взгляды, установки, позиции, поведение и действия военнослужащих, что позволяет освоившему его будущему педагогу увереннее чувствовать себя в многонациональной аудитории обучаемых.

Обладание твердой и непреклонной волей, умение контролировать эмоции, чувства и волю других, достигающее наивысшей точки в период прохождения учебных военных сборов, позволяет будущему педагогу управлять любым коллективом. Студент, готовящий себя как будущего офицера запаса, которому предстоит руководить подчинёнными, должен вырабатывать у себя эмоционально-волевую устойчивость и следующие правила поведения: постоянно сохранять спокойствие, не выражать волнения внешне; никогда не принимать необдуманных решений; тщательно взвешивать и анализировать свои поступки; не поддаваться первому впечатлению; не отступать перед трудностями; на учебных занятиях и дежурстве действовать с полной отдачей сил.

Развитое чувство собственного достоинства, умение постоять за себя, защитить свое личное достоинство и уважать достоинство других – важное качество педагога, формируемое всем укладом военного обучения.

Знание основ работы с людьми, умение проявлять чуткость и внимательность к подчиненным, сочетать высокую требовательность и принципиальность с уважением их личного достоинства основывается на педагогической составляющей подготовки педагогов по основной специальности. На совершенствование этих качеств существенно влияет личная примерность офицеров военных кафедр.

Знание и точное соблюдение правил и положений, установленных воинскими уставами, законами, поддержание образцового внешнего вида и строевой подтянутости – значимые качества офицеров, позволяющие будущим педагогам решать многие задачи в педагогическом взаимодействии.

Владение компьютерными технологиями сбора, хранения, обработки и использования информации есть особенность военной подготовки будущих специалистов образовательной отрасли «Информатика, вычислительная техника и компьютерные технологии», т.е. их профессиональная педагогическая подготовка. Студенты названной специальности не только самостоятельно разрабатывают компьютерные обучающие программы, используемые в учебном процессе, но и квалифицированно объясняют другим студентам правила работы с программами. Для разработки подобных программ студенты должны очень глубоко изучить соответствующую тему, а также динамику моделируемых процессов. Это способствует более глубокому изучению теоретических положений и выработке практических навыков в обслуживании вооружения и военной техники.

Стремление к самосовершенствованию, умение планировать профессиональную карьеру, профессиональное и личностное саморазвитие, приобретать новые знания и использовать для этого современные информационные образовательные технологии – важная черта современного офицера, способствующая, в том числе, развитию будущего педагога. Вера в себя, в свои силы и способности, в свое призвание, в правильность выбора жизненного пути, в успех – это качество, как никому другому, свойственно будущим специалистам образовательной отрасли «Информатика, вычислительная техника и компьютерные технологии» и прививается методом упражнения при решении различных задач.

Честность и порядочность, верность слову, единству слова и дела – основа основ педагогического мышления, прививаемая во время всего обучения в вузе и особенно военной подготовки с использованием различных методических приемов.

В заключение хочется отметить, что программы подготовки офицеров запаса и воспитания командирских качеств будущих педагогов реально выполняются.

Непременным условием результативного воспитания командирских качеств выступает систематическая и целеустремленная работа по формированию и совершенствованию положительных и устранению отрицательных качеств личности в соответствии с программой воспитания командирских качеств.

Под методами воспитания командирских качеств понимается некая совокупность приемов разнородного педагогического воздействия на человека со стороны его самого и общества в интересах выработки требуемых личностных качеств. Прием же следует рассматривать как более частное воздействие на человека, представляющее в каждом конкретном случае какой-то единичный акт.

Система методов и приемов воспитания командирских качеств для каждого будущего офицера индивидуальна. Вместе с тем, анализ практики воспитания командирских качеств позволяет выделить группу наиболее эффективных методов – самоубеждение, самообязательство, самоорганизация жизни и деятельности, аутотренинг, самоконтроль, а также соответствующие методы, применяемые офицерами-воспитателями.

В основе метода аутотренинга лежит эмоционально-волевая тренировка, суть которой заключается в развитии способностей к воздействию на психорегулирующие процессы. В ходе таких тренировок человек в состоянии сам себе создать модель представлений, чувств, эмоций, состояний, а также ввести эту модель в свою психику путем сосредоточения внимания или многократного повторения.

Рассмотренные методы воспитания командирских качеств на практике реализуются совокупностью различных однородных по своему педагогическому предназначению приемов. К числу наиболее распространенных приемов воспитания командирских качеств у будущих педагогов профессионального обучения относятся самовнушение, самоупражнение, самокритика, самопоощрение, самопринуждение, самонапоминание, самоотчет [3].

Анализ процесса воспитания командирских качеств дает основание заключить, что это сложный и многоплановый педагогический процесс с присущими ему внутренними противоречиями. Процесс работы будущих офицеров над собой не должен уходить из поля зрения профессорско-преподавательского состава военных кафедр, он должен рассматриваться как составляющая часть процесса формирования педагогического мышления и кафедры технологий профессионального обучения. Им необходимо постоянно управлять, осуществлять педагогическое руководство.

В настоящей статье рассмотрено влияние педагогических приемов, применяемых в ходе военной подготовки, на формирование у будущих педагогов специальности «Профессиональное обучение (информатика, вычислительная техника и компьютерные технологии)» педагогического мышления, на их психологическую адаптацию к профессиональной деятельности, воспитание в них смелости, решительности, патриотизма, умения достигать поставленных перед собой целей [4].

## Литература

1. Потеев М.И., Горлушкина Н.Н. Инновационная направленность воспитания воспитателей при подготовке педагогов профессионального обучения и преподавателей высшей школы. / Межвузовский сб. научно-метод. ст. «Проблемы подготовки преподавателей высших учебных заведений по воспитательной работе со студентами в

- современных условиях». Под ред. А.С. Бургонского. СПб: СПб ГУ ИТМО., 2004. С. 247–258.
2. Хромов И.Н. Формирование патриотизма у студентов – будущих педагогов профессионального обучения в области компьютерных технологий в ходе военного обучения. / Межвузовский сб. научно-метод. ст. «Проблемы подготовки преподавателей высших учебных заведений по воспитательной работе со студентами в современных условиях». Под ред. А.С. Бургонского. СПб: СПб ГУ ИТМО., 2004. С. 266–272.
  3. Гавриш В.М., Хромов И.Н. Методика самовоспитания командирских качеств у студентов, проходящих военное обучение по программам подготовки офицеров запаса / Научно-тех. вестник СПб ГУ ИТМО. Вып. 12. СПб: СПб ГУ ИТМО, 2004. С. 207–210.
  4. Корчемный П.А., Лаптев Л.Г., Михайловский В.Г. Военная психология и педагогика: Учебн. пособие. М. Совершенство, 1998. 384 с.
  5. Хромов И.Н. О влиянии военной подготовки студентов специальности «Профессиональное обучение» на формирование педагогов профессионального обучения. / Межвузовский сборник научно-методических статей «Информационные технологии в профессиональном и профессионально-педагогическом образовании». Под ред. проф. М.И. Потеева. СПб: СПб ГУ ИТМО. 2003. С. 84–92.
  6. Коджаспирова Г.М., Коджаспиров А.Ю. Педагогический словарь. Для студ. высш. и сред. пед. учеб. заведений. М.: Изд. центр «Академия», 2001. 176 с.

# АНАЛИЗ ЛИТЕРАТУРЫ ПО МЕТОДИКЕ ПОДГОТОВКИ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОНСУЛЬТАНТОВ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

С.В. Кессель

В настоящее время, благодаря бурному развитию сферы информационных технологий в России, возрос спрос на профессиональных консультантов в области информационных технологий (ИТ-консультантов), т.е. высококлассных специалистов, осуществляющих внедрение программных продуктов на предприятиях. Такой специалист должен обладать широкими знаниями как в предметной области (информационные технологии и, в частности, бизнес-системы), так и в области психологии и педагогики, так как значительная часть профессиональной деятельности консультанта связана с обучением пользователей.

Наиболее близкой к профессиональному консультированию среди образовательных отраслей, по которым ведется подготовка в рамках специальности 030500, является специальность «Профессиональное обучение (информатика, вычислительная техника и компьютерные технологии)». Лицам, прошедшем обучение по этой специальности, присваивается квалификация «Педагог профессионального обучения». Однако профессиональный консультант в области информационных технологий, как правило, должен быть специалистом не только в информационных технологиях и информатике, но и в ряде других предметных областей – бухгалтерском и управлении, логистике, организации и управлении производством, менеджменте и т.д.

Таким образом, для подготовки профессиональных ИТ-консультантов необходимо дать образование, которое включало бы в себя все указанные области профессиональной компетенции. Разработка методики подготовки таких специалистов и составляет основную задачу исследований автора. В данном исследовании делается краткий обзор доступных изданий по тематике консультирования, которые представляют интерес при разработке методики подготовки профессиональных консультантов в общем и, в частности, профессиональных консультантов в области информационных технологий.

Вопросы профессионального консультирования в общем и консультирования по использованию информационных технологий частично освещены в зарубежной литературе. К сожалению, на русском языке такая литература в большинстве своем недоступна. Однако, в связи с повышенным интересом читателей, издатели начали обращать внимание на такую литературу, и есть надежда, что ситуация с переводными изданиями в ближайшем будущем улучшится.

Из доступных книг на русском языке, прежде всего, необходимо отметить работу [1]. Она представляет собой наиболее полное и основательное рассмотрение вопроса профессионального консультирования, книга выдержала несколько изданий на различных языках. В книге всесторонне рассматривается процесс консультирования, состоящий из пяти фаз: ознакомление, диагноз, планирование действий, выполнение и завершение. Она дает общее представление о методах консультирования и профессии консультанта. Особое внимание уделено отношениям «консультант–клиент». Рекомендации, приводящиеся в книге, позволяют повысить результативность решения управлении проблем, возникающих в условиях развития рынка. Не так давно вышло 4-е издание на русском языке, что однозначно показывает интерес к изданию как со стороны читателей, так и со стороны издателя.

Книга [2] носит менее теоретический характер, основной упор делается на практический опыт автора. В этой книге, неоднократно издававшейся в Великобритании, рассматриваются основные вопросы консультационной деятельности: экономика консалтинговой фирмы, управление взаимоотношениями консультанта и клиента. В издании анализируются навыки, которыми должен обладать консультант: сбор данных и

проектирование преобразований, устная и письменная коммуникация, рациональное убеждение. Книга также содержит некоторые практические советы для тех, кто только помышляет о карьере консультанта. Издание предназначено не только для консультантов в сфере управления (как начинающих, так и опытных), но и для всех, чья деятельность требует аналогичных профессиональных навыков. Эта книга будет полезна и клиентам консалтинговых компаний: она поможет эффективнее использовать услуги консультантов. Книгу характеризует живой язык консультанта-практика, она наполнена практическими примерами, что делает ее чрезвычайно захватывающей и интересной.

К сожалению, в книге не уделено достаточно внимания *подготовке* консультантов (хотя и дается ряд ценных советов тем, кто собирается сделать консультирование своей профессией), не говоря уже о *методике* подготовки. Более того, автор подчеркивает, что основа умения консультанта – практика. Ни в коем случае не умаляя достоинств книги и важности практики для становления профессионального консультанта, хочется подчеркнуть, что возможно построения *методики* подготовки профессионалов, готовых стать консультантами. Также необходимо отметить, что автор книги затрагивает в основном вопросы *управленческого консультирования*, в то время как консультирование по вопросам информационных технологий имеет ряд принципиальных особенностей, на которые следует обратить внимание.

Из российских изданий, посвященных вопросам управленческого консультирования, необходимо отметить работы [3, 4]. В частности, книга [3] представляет собой первое отечественное пособие для преподавателей экономических и бизнес-дисциплин образовательных учреждений России, в котором рассматриваются методические и организационные основы консалтинга как существенной части сектора инфраструктурных и профессиональных услуг. Пособие подготовлено на основе российского и зарубежного опыта консалтинга и ориентировано как на преподавателей образовательных учреждений, так и на консультантов, специалистов в области всех отраслей экономики и управления, предпринимателей и менеджеров предприятий – пользователей консультационных услуг.

Хотя в книге консалтинг рассмотрен также и с теоретической стороны – выделены субъекты и объекты консалтинга, обсуждается определение консалтинга – основной акцент в указанной книге, в отличие от [1], сделан на практическую сторону вопроса. Рассматриваются вопросы маркетинга консультационных услуг, формирования спроса на такие услуги, а также методы работы консультантов при осуществлении консалтинга. В книге отражена специфика консультационных услуг в России, что значительно увеличивает ценность данного издания.

Из других достоинств книги необходимо отметить, что в книге рассмотрен процесс обучения консультантов, что делает издание еще более ценным. Автор не делает акцент на какой-либо области консультирования, что, с одной стороны, обеспечивает универсальность пособия, однако, с другой стороны, при применении его на практике необходимо учитывать специфику области, в которой ведется консультирование. Также необходимо отметить, что автор дистанцирует консалтинг, который является формой внедрения экономических и управленческих знаний в деловую практику, как от непосредственного управления, так и от обучения.

Работа [4] представляет собой практическое пособие по консалтингу для предпринимателей – представителей консалтингового бизнеса и их клиентов. Рассмотрены основные понятия консалтинга, его особенности в условиях российской экономики. Консультирование рассматривается с двух позиций – позиции объекта и субъекта консультирования. С точки зрения консультанта рассмотрена специфика услуг в различных областях консультирования, начиная от аудита и бухгалтерского обслуживания и заканчивая тренингом как особым видом консультирования.

Таким образом, книга не фокусируется на какой-либо одной области консалтинга, однако рассматривает особенности каждой из них, в том числе области обеспечения информационными технологиями, таким образом позволяя получить представление об услугах, оказываемых в каждой из областей, и их (областей) специфике. С точки зрения потребителя консультационных услуг рассматриваются все вопросы, возникающие при работе с консультантом, начиная от принятия решения о необходимости использования консалтинговых услуг, выбора консультанта, подготовки к работе с ним, до непосредственно выполнения проекта совместно с консультантами.

Из достоинств книги нужно отметить полноту охвата вопроса как с точки зрения консультанта, так и с точки зрения клиента, а также наличие большого числа примеров, иллюстрирующих стоящие перед консультантами задачи и методы, использованные при их решении. Такая подача материала позволяет не терять связь теоретических советов с практикой, лучше усваивать материал. Недостаток книги вытекает непосредственно из ее ориентации – вследствие того, что книга ориентирована на пользователей консалтинговых услуг и собственно консультантов, вопросы подготовки профессиональных консультантов оставлены в стороне.

В издании [5] подробно освещены основные вопросы, связанные с консультационной деятельностью, начиная от ее сущности и содержания и заканчивая вопросами развития консультационных услуг в России. Подробно рассмотрены причины обращения к консультантам, виды консультационных фирм и история становления управленческого консультирования. Даются практические советы, которые могут быть полезны как консультантам, так и их клиентам: как найти и выбрать консультационную фирму, рассматриваются контракты на консультационные услуги и принципы организации отношений «клиент-консультант». Предлагаются на рассмотрение модели консультирования и управления изменениям, даются основы процесса консультирования и организации работ. Достаточно подробно изучаются методы консультирования и вопросы обеспечения качества консультационных услуг. Рассматриваются вопросы специфики консультирования муниципальных организаций. В книге всесторонне затрагиваются как теоретические, так и практические вопросы, как со стороны консультанта, так и со стороны клиента, что делает книгу интересной и полезной для широкого круга лиц. Однако специфика консультирования в какой-либо из областей не рассмотрена, хотя рассмотрена специфика работ на рынке консультирования муниципальных организаций. Также не затронут еще один важный и интересный вопрос – подготовка консультантов.

Из учебных пособий необходимо отметить издания [6, 7]. В учебнике [6] рассмотрены вопросы, связанные с управленческим консультированием корпоративных организаций: развитие консалтинга, виды и методы консультирования, роль консультантов в построении корпоративной культуры организации, совершенствование управления организацией на основе внутреннего консультирования, роль топ-менеджмента в системе управления организацией и др. В учебнике хорошо освещены все основные вопросы консультирования, начиная от сущности понятия «Управленческий консалтинг», его истории, специфики российского рынка услуг, и до вопросов, появляющихся в процессе консультирования. Учебник дает хорошее представление о консалтинге и рынке консультационных услуг. К сожалению, вопросы специфики консультирования в различных областях управления (бухгалтерский учет, управление кадрами, управление производством, информационные технологии) остались за рамками спецкурса, для которого подготовлен указанный учебник. Также за рамками остались вопросы, связанные с подготовкой профессиональных консультантов, качествами и знаниями, которыми должен обладать хороший консультант.

Издание [7] ориентировано на тех, кто изучает курс «Управленческое консультирование» в соответствии с Государственным образовательным стандартом направления

521500 – Менеджмент, утвержденным Гособразованием России от 02.03.2000. Книга ориентирована на широкий круг лиц, интересующихся проблемами развития российской экономики, и, прежде всего, на студентов высших учебных заведений экономического профиля при подготовке к экзамену по данному курсу. В книге подробно рассмотрены основные понятия консультирования, а также различные аспекты консультационной деятельности – от особенностей ценообразования на консалтинговые услуги до вопросов обеспечения качества консультационных услуг. Рассмотрена специфика консультирования в различных областях – от консалтинга по управлению изменениями и антикризисного консалтинга до консультирования по вопросам производства, логистики, работе с персоналом. Также рассмотрены особенности консалтинга в области использования информационных технологий. Недостаток книги вытекает из ее ориентации – материал организован по вопросам к экзамену. С одной стороны, это облегчает подготовку к экзамену для студентов, с другой – делает невозможным удобный поиск интересующего материала.

Таким образом, обозначена проблемная область, представляющая интерес в качестве объекта исследования. Проведен обзор работ по тематике «Профессиональное консультирование» и выявлено, что вопросы подготовки профессиональных консультантов, если и затрагиваются в существующих изданиях, то весьма поверхностно. Таким образом, разработка методики подготовки профессиональных консультантов становится одной из актуальных задач профессионально-педагогического образования.

## **Литература**

1. Управленческое консультирование. / Под ред. М. Кубра. М.: Интерэксперт, 1992. 319 с.
2. Макхэм К. Управленческий консалтинг. / Пер. с англ. М: Издательство «Дело и Сервис». 1999. 288 с.
3. Посадский А.П. Основы консалтинга: Пособие для преподавателей экономических и бизнес-дисциплин. М: ГУ ВШЭ, 1999. 240 с.
4. Посадский А.П., Хайниш С.В. Консультационные услуги в России: Практическое пособие для менеджеров и предпринимателей. М.: Финстатинформ, 1995. 175 с.
5. Кузнецова Л.А. Управленческое консультирование. 2002.
6. Блинов А.О., Бутырин Г.Н., Добренькова Е.В. Управленческий консалтинг корпоративных организаций: Учебник. М.: Инфра-М, 2002. 192 с.
7. Гульковский А.В., Рысюк В.Н.. Управленческое консультирование. Вопросы и ответы. М.: Юркнига, 2004. 288 с.

# ПРЕЕМСТВЕННОСТЬ В ИЗУЧЕНИИ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

## Е.А. Сергеева

Стремительное увеличение потоков информации и роли информационных технологий в современном обществе должно идти параллельно с формированием информационной культуры членов этого общества. В качестве решения проблемы преемственности информационной культуры при изучении компьютерных технологий предлагается проектный метод.

Общемировой процесс информатизации, характерной особенностью которого является возрастание роли информации и трансформации ее в важнейший ресурс экономического и социального развития, проник во все сферы человеческой жизни, в том числе не оставив без внимания образовательную среду. По сути, информатизация представляет собой процесс (рис. 1) преобразования человеком среды своего существования – биосферы – в ноосферу, результатом которого станет создание высокоразвитой инфосферы [1]. Глубина совершаемых преобразований может коренным образом изменить не только ход информатизации, но и само существование человеческого общества как биологического вида.

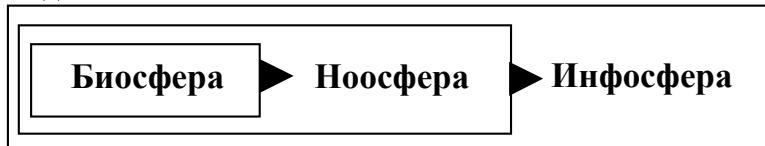


Рис. 1. Процесс преобразования окружающей среды

В связи с обозначенной ответственностью, результатом подготовки общества к информатизации должно стать формирование информационной культуры, начальной ступенью которой является компьютерная грамотность всех членов общества. При этом надо помнить, что необходимым условием успешной информатизации страны является высокая общекультурная, нравственная и профессиональная подготовленность населения. Именно информатизация образования как одно из направлений процесса информатизации современного общества способна повлиять на информационную культуру – умение целенаправленно работать с информацией и использовать для ее получения, обработки и передачи компьютерные информационные технологии, современные технические средства и методы. Для свободной ориентации в информационном потоке современный человек должен обладать информационной культурой как одной из составляющих общей культуры.

Процесс информатизации (рис. 2) рассматривается как процесс, включающий в себя три взаимосвязанных подпроцесса [2]:

- медиатизация – развитие и совершенствование средств сбора, хранения и распространения информации;
- компьютеризация – расширение, совершенствование и обработка информации, получаемой из источников ее формирования;
- интеллектуализация – развитие знаний и способностей людей к восприятию и генерации информации, что закономерно обуславливает повышение интеллектуального потенциала общества, включая возможность использования средств искусственного интеллекта.

Информатизация должна иметь своей целью сохранение и развитие национального способа мышления, ментальности, позволяющей эффективно познавать и моделировать социальные процессы в том или ином конкретном объекте на базе возможностей, предоставляемых новыми информационными технологиями.

Информационная технология (ИТ) – процесс, использующий совокупность средств и методов сбора, обработки и передачи данных для получения информации нового качества о состоянии объекта, процесса или явления. Современная ИТ опирается на достижения в области компьютерной техники и средств связи. Этапы развития информационных технологий соответствуют периодам информационных революций – от «ручной» до «компьютерной» информационных технологий.



Рис. 2. Процесс информатизации

Информатизация общего среднего и высшего образования, реализация возможностей современных информационных технологий [3] влечет за собой расширение спектра видов учебной деятельности, совершенствование существующих и возникновение новых организационных форм и методов обучения, расширение и углубление изучаемых предметных областей, интеграцию тем или учебных предметов. Это обуславливает необходимость интенсификации процессов интеллектуального развития и саморазвития личности обучающегося, формирования умений формализовать знания о предметном мире, самостоятельно извлекать знания, осуществлять «открытия» в изучаемой предметной области.

Образовательный проект, затрагивающий различные ступени образования, сформировался на основе применения компьютерных технологий в интегративном курсе «Естествознание». Создание сквозной компьютерной поддержки учебного курса с 2000 года осуществляется в содружестве СПбГУ ИТМО и гимназии № 261.

За время работы над проектом сформировалась динамическая рабочая группа «школа – вуз». Актуальность деятельности группы состоит в потребности применения современных форм и средств обучения, например, мультимедийных программ, а для этого необходимо, в первую очередь, организовать мощную базу по созданию и внедрению таких программ.

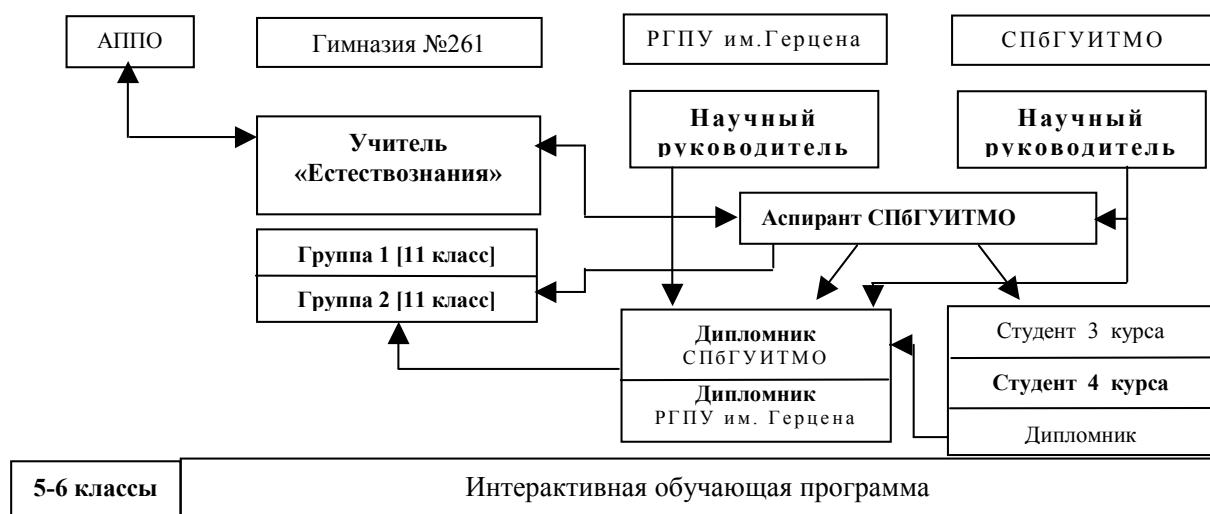


Рис. 3. Схема взаимодействия рабочей группы в 2003/2004 уч.г.

Рассмотрим подробнее роль каждого соисполнителя проекта:

- непосредственное выполнение программ осуществляется дипломниками СПбГУ ИТМО и РГПУ им. Герцена;
- апробация и внедрение программ происходит с участием 5-6 классов;
- старшеклассники гимназии предоставляют графический материал;
- методические рекомендации и консультации предоставляет Академия постдипломного педагогического образования.

С 2003 года к работе над проектом подключились студенты 3 курса СПбГУ ИТМО. В рамках дисциплины «Компьютерные технологии» студенты осуществляют разработку мини-программ, основываясь на Flash-технологии – современном программном средстве по созданию мультимедийных программ.

Далее, в порядке совершенствования знаний и умений, студентам предоставляется возможность изучить тематику проекта, ознакомиться с содержательной частью программ. В перечень работ входит переработка базовой компьютерной обучающей программы с учетом методических рекомендаций консультанта. В результате такой работы программа претерпевает ряд качественных изменений.

Выполнение подготовительной работы студентом помогает ему понять структуру компьютерной обучающей программы, получить опыт ее создания, оценить уровень своих знаний и возможностей, усовершенствовать их и, таким образом, подготовиться к выполнению своей выпускной квалификационной работы в рамках проекта. Тем самым прослеживается преемственность «студент – специалист».

За период 2000–2004 г.г. рабочей группой был реализован комплекс из шести интерактивных обучающих программ, которые используются в гимназии № 261 на уроках предмета «Естествознание», а также в СПбГУ ИТМО и СПбГЭТУ в рамках дисциплин «Концепции современного естествознания» и «Экология» соответственно.

Изучение интегративного курса важно не только в 5–6 классе общеобразовательной школы. Как показывает практика, старшеклассники и студенты, отрабатывая межпредметные связи при подготовке компьютерных программ, систематизируют изученный ранее материал, что является полезным фактором в обучении. Неотъемлемой частью каждой из разработанных компьютерных обучающих программ является экологическая составляющая.

Подобные компьютерные обучающие программы – это не только инструмент для улучшения качества образования, но и средство иной организации обучения, с учетом специфики содержания, применения мультимедийных компьютерных технологий и работы разноуровневой группы.

Конечными результатами работы межвозрастной разноуровневой группы являются как созданные компьютерные обучающие программы, так и написанные на их базе выпускные квалификационные работы. К достоинствам проектного метода можно отнести также получение опыта работы в группе, приобретение новых знаний и умений, развитие творческого потенциала.

№/№	Название компьютерной обучающей программы	Год создания
1	«Космическая роль зеленых растений на планете»	2001
2	«Биогеохимическая роль горных пород, минералов и почвы»	2002
3	«Атмосфера» - часть 1	2002
4	«Гидросфера»	2003
5	«Атмосфера» - часть 2	2003
6	«Природа как система»	2004

Таблица 1. Комплект компьютерных обучающих программ по предмету «Естествознание»

Целью такой деятельности является не только преемственность в изучении компьютерных технологий. На новом уровне представляется возможность проследить образовательную цепочку, состоящую из:

- учащихся 5–6 классов, для которых КОП – современный инструмент в изучении учебного предмета и развитии информационной культуры через системный взгляд на окружающий мир [4];
- учащихся 11 классов, которые не только изучают современные компьютерные технологии, а именно Flash-технологию, но и систематизируют свои естественнонаучные знания, проявляют творческие способности, приобретают навыки коммуникабельности и работы в группе;
- студентов 3 курса, которые осваивают Flash-технологию в рамках дисциплины «Компьютерные технологии»;
- студентов 4 курса, которые на основе знания технологии и идеологии проекта совершенствуют свои знания и умения в области компьютерных технологий в образовании;
- бакалавров и дипломников, приобретающих возможность создания выпускной квалификационной работы с использованием современных компьютерных технологий, отработки межпредметных связей и дальнейшего внедрения результатов своего труда в образовательный процесс в качестве современного инструментария.

Подобную схему взаимодействия членов рабочей группы можно перенести на уровень высшей школы, задействовав при этом дисциплины «Концепции современного естествознания», «Компьютерные технологии» и студентов естественнонаучного факультета.



Рис. 4. Схема взаимодействия рабочей группы в вузе

Достижениями проекта можно считать:

- победу в конкурсе проектов студентов, аспирантов и молодых ученых, направленных на решение проблем в сфере городского хозяйства и социально значимых проблем, в секции «Автоматизация обучения»;
- выпускные квалификационные работы студентов СПбГУ ИТМО и РГПУ им. Герцена по тематике проекта, за период с 2001 года защищаемые на «отлично»;
- дипломы, врученные старшеклассникам за творческую разработку темы на районной научно-практической конференции на естественнонаучной секции;
- участие в международных конференциях, доклады в городском естественнонаучном клубе;
- участие в ретроспективной выставке проектов, решавших задачи в сфере городского хозяйства и социальные проблемы молодежи.

Обучение с использованием компьютерных технологий – это современное направление обучения, реализующее как инновационные средства преподавания и учения, так и новые принципы педагогической техники, такие как принцип деятельности,

принцип обратной связи, принцип идеальности. Все это позволяет иначе проектировать занятия, подавать материал, обрабатывать информацию на качественно новом уровне.

### **Литература**

1. Потеев М.И. Концепции современного естествознания: Учеб. для студ. вузов. СПб.: Питер, 1999. 351с.
2. Соколова И. В., Социальная информатика и социология: Проблемы и перспективы взаимосвязи. М.: Союз, 1999. 228 с.
3. Ширшов Е.В. Информационно-педагогические технологии: хронология становления и развития: Учебное пособие / Под ред. д-ра пед. наук, проф. Т.С. Буториной. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2003. – 172 с.
4. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Айрис-Пресс, 2002. 576 с.

# ОБУЧЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ОБРАЗОВАНИИ ОСНОВАМ НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

С.С. Акимов

Научно-исследовательская деятельность в информационном обществе относится к числу самых престижных, социально-значимых и экономически целесообразных сторон деятельности человека. Она обеспечивает перспективное развитие экономики, существенно обогащает культуру, привносит запас прочности в интеллектуальный потенциал общества, определяющий социальный прогресс. В современном мире она выполняет следующие функции: аналитическую; ориентационную; прогностическую; информационную; инновационную; моделирующую; системообразующую; оптимизирующую [1].

Классификация задач обучения научно-исследовательской деятельности представлена в работе [2]. Она включает: 1) поиск научной информации (работа с литературой, периодической печатью, информационными системами); 2) выбор методов и проведение научных исследований; 3) обработка и оформление результатов исследования; 4) освоение новых теорий, моделей и методов научных исследований; 5) самостоятельная формулировка новых задач, возникающих в процессе деятельности и умение их решать.

В условиях быстрого увеличения информации в профессиональной области знаний, необходимо владеть общими способами получения необходимых знаний. В процессе подготовки бакалавров технологического образования необходимо обучить студентов владению общими способами проведения научно-исследовательской деятельности. Бакалавр технологического образования должен владеть последовательностью этапов проведения исследования, что позволит решать проблемы в быстро меняющихся условиях развития общества, принимать оперативные профессиональные решения в сфере современных технологий преобразования материальных, энергетических и информационных сред, а также технологий в экономике, сфере услуг и быта, производстве.

Подготовка студентов к научно-исследовательскому виду деятельности состоит в последовательном овладении всеми ее компонентами. Эффективное овладение студентом исследовательской деятельностью реализуется с помощью научно-исследовательской деятельности студентов.

Научно-исследовательская работа студентов является неотъемлемой частью подготовки специалистов в системе профессионального образования и оказывает существенное влияние на повышение его качества, содействует решению остройшей кадровой проблемы в науке и образовании, способствует успешной адаптации выпускников вузов в обществе и на рынке труда [3].

Научно-исследовательская деятельность студентов рассматривается как поисковая деятельность научного характера, направленная на объяснение явлений, процессов, установление их связей и отношений, теоретическое и экспериментальное обоснование фактов, выявление закономерностей посредством научных методов познания, в результате которой субъективный характер «открытый» может приобретать определенную объективную значимость и новизну [4]. Эта деятельность представляет собой синтез учебной исследовательской работы студентов и внеучебной научно-исследовательской работы студентов, а также научно-организационной работы студентов [5].

Под учебно-исследовательской деятельностью студентов понимают работу студентов, обеспечивающую приобретение необходимых навыков творческой исследовательской деятельности, которая завершается самостоятельным решением студентами задач, уже разработанными в науке или технике [5].

В процессе обучения основам научных исследований в области технологического образования необходимо учитывать возможный уровень учебно-исследовательской

деятельности студентов и по возможности осуществлять обучение научному исследованию на разных уровнях. В исследовательской деятельности можно выделить следующие уровни:

- *1 уровень*, когда творческие и исследовательские задачи студентам ставятся в инициативном порядке отдельными педагогами (исследовательская деятельность в данном случае понимается как форма учебной работы);
- *2 уровень*, когда исследовательская деятельность развивается по многим направлениям и начинает создаваться педагогами как подход к внедрению образовательной деятельности;
- *3 уровень*, когда к системе исследовательской деятельности подключается научное учреждение [6].

В рамках деятельностного подхода и степени самостоятельности выделяют следующие уровни учебно-исследовательской работы студентов:

1. *репродуктивный* – выполнение работы по образцам без внесения в нее каких-либо корректив, под непосредственным контролем руководителя;
2. *алгоритмический* – студент совместно с преподавателем определяет возможную тему исследования и последовательность действий по ее раскрытию; студент самостоятельно выбирает способы и приемы работы; роль преподавателя сводится к рекомендациям;
3. *эвристический* – студент самостоятельно определяет тему исследования и последовательность действий по ее разработке, обращаясь, в случае затруднения, к помощи преподавателя; в известные методики исследования студентом вносятся собственные, обоснованные коррективы;
4. *продуктивный* – предполагает полную самостоятельность студента в определении проблемы исследования и деятельности по ее разрешению; преподаватель выступает как эксперт при оценке этого результата.

По новизне содержания и характеру его обобщенности выделяют следующие уровни учебно-исследовательской деятельности студентов:

1. *реферативный* – вычленение и подбор фактов, описанных в литературе, в соответствии с выбранным направлением исследования; вычленение и описание подходов, мнений, суждений к изучаемому вопросу;
2. *структурный* – логический или системный анализ известных фактов;
3. *исследовательский* – анализ реального учебного процесса, построение оригинальной модели этого процесса, моделирование возможных следствий и их проверка в реальном учебно-воспитательном процессе.

В работе [2] выделены уровни обучения проведению исследований, которые можно представить в следующем виде:

1. *учебно-исследовательская деятельность (работа) студентов* (постановка задачи, предварительный анализ имеющейся информации, условий, методов, планирование и организация эксперимента, анализ и обобщение полученных результатов, их объяснение);
2. *исследовательская деятельность (работа) студентов* (освоение новых компонентов – формулировка исходных гипотез, теоретический анализ гипотез, проверка гипотез на основе полученных фактов, формулировка новых фактов, получение объяснений и научных предсказаний);
3. *научно-исследовательская деятельность (работа) студентов* (осваиваются все компоненты научного исследования).

Обучение основам научных исследований в технологическом образовании обуславливает качество подготовки выпускника, его конкурентоспособность на рынке труда, формирование умений решать профессиональные задачи.

Необходимо отметить, что обучение научному поиску следует осуществлять на разных уровнях (от репродуктивного к исследовательскому), причем эта система должна быть сквозной (охватывать весь процесс обучения студентов).

Таким образом, можно говорить о том, что качество подготовки бакалавров технологического образования определяется, в частности, подготовкой к проведению научных исследований (владением общими способами научного поиска в сфере технологического образования). Это определяет актуальность разработки теоретических и практических вопросов обучения студентов основам научного поиска в области образования.

### **Литература**

1. Загузов Н.И., Писарева С.А., Тряпицына А.П. Современные диссертационные исследования по педагогике: Книга для эксперта. Монография. М., 2003.
2. Лобова Г.Н. Основы подготовки студентов к исследовательской деятельности. М.: ИЦ АПО, 2000.
3. О состоянии и развитии научно-исследовательской работы студентов высших учебных заведений: Решение Коллегии №9/1 от 10.06.2003 года [Электронное издание]- [http://depart.ed.gov.ru/ministry/struk/kolleg/resh/03/rk9\\_1.html](http://depart.ed.gov.ru/ministry/struk/kolleg/resh/03/rk9_1.html)
4. Багачук А.В. О повышении качества научно-исследовательской деятельности студентов в педагогическом вузе [Электронное издание]- <http://seminar.kspu.ru>
5. Организация и содержание научно-исследовательской работы студентов педагогических вузов: Методическое пособие. / Под ред. В.И. Богословского. СПб, 1999.
6. Гражданкина Л.Н. Формирование системного подхода к организации научно-исследовательской деятельности студентов в процессе самостоятельной работы [Электронное издание]- <http://college.biysk.secna.ru/news/cit/cit2/grajdan.doc>

## АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕМОРА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ

Г.С. Иванов

Дано краткое описание информационно-измерительного комплекса, обеспечивающего регистрацию непроизвольных перемещений конечностей человека (тремора). Показано, что возможно выделение характерных частот в области 0–12 Гц, которые свойственны именно данному человеку, и данная характеристика может быть использована в качестве биометрического параметра для идентификации личности пользователя информационных ресурсов.

Среди методов биометрической идентификации личности особое место занимают динамические методы, основанные на анализе динамических параметров личности. В ряду динамических параметров можно выделить такую малоизученную характеристику, как непроизвольные движения конечностей человека (тремор) [1, 3]. Исследования этой характеристики актуальны с точки зрения ее использования в качестве признака для идентификации личности пользователя той или иной информационной системы. В настоящее время разработаны и широко используются сенсоры движений человека, которые, в основном, регистрируют не абсолютное перемещение, а вторую производную от перемещения, т.е. являются акселерометрами [1]. В результате в таких измерительных комплексах возникает проблема регистрации абсолютных перемещений и низкочастотных сигналов (в герцовом диапазоне). Вместе с тем, как показали исследования, именно низкочастотная область спектральной характеристики трепорограмм конечностей несет в себе наибольшую информацию об изменении в регуляции двигательных функций человека. Указанный диапазон частот наиболее подвержен изменениям в показателях в случае изменения состояния человека.

Для регистрации непроизвольных движений конечностей человека целесообразно использовать измерительный комплекс на основе датчиков токовихревого типа. Весь комплекс содержит сенсорный блок, блок обработки сигналов, систему интерпретации данных и принятия решений (рис. 1). Сенсорный блок имеет токовихревой датчик в виде спирали Архимеда, который встроен в качестве индуктивности в колебательный контур на кварцевом резонаторе.

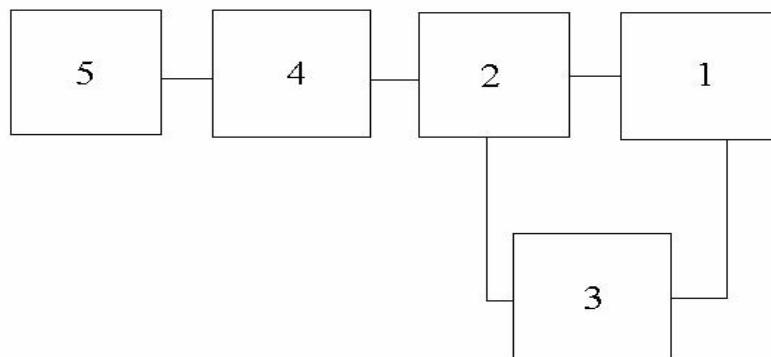


Рис. 1. Структурная схема устройства для регистрации непроизвольных движений конечностей человека: 1 – сенсорный блок, содержащий токовихревой датчик; 2 – блок обработки сигналов (на основе модулятора); 3 – генератор высокой частоты; 4 – аналого-цифровой преобразователь (звуковая карта персонального компьютера); 5 – персональный компьютер

Исследования серии токовихревых датчиков позволили построить обобщенную характеристику

$$U = KX + B \quad (1)$$

и выполнить расчет аппроксимирующих функций и их характеристик в области квазилинейного поведения сенсора. Установлено, что линейная аппроксимация функции выхода  $U$  от расстояния  $X$  между сенсором и ответной токопроводящей пластиной (надевается на палец) с погрешностью, не превышающей 3%, в интервале измерений  $X = 0\text{--}4$  мм удовлетворяет требованиям точности регистрации биологических измерений непроизвольного движения конечностей человека. Исследования показали, что только сильно выраженные патологии двигательных функций человека не укладываются в указанный интервал измерений  $X$ , а среднестатистический человек имеет трепор конечностей с амплитудой, не превышающей 3 мм. Для иллюстрации приведем пример графика, который показывает диапазон линейных и нелинейных характеристик токовихревого датчика (рис. 2).

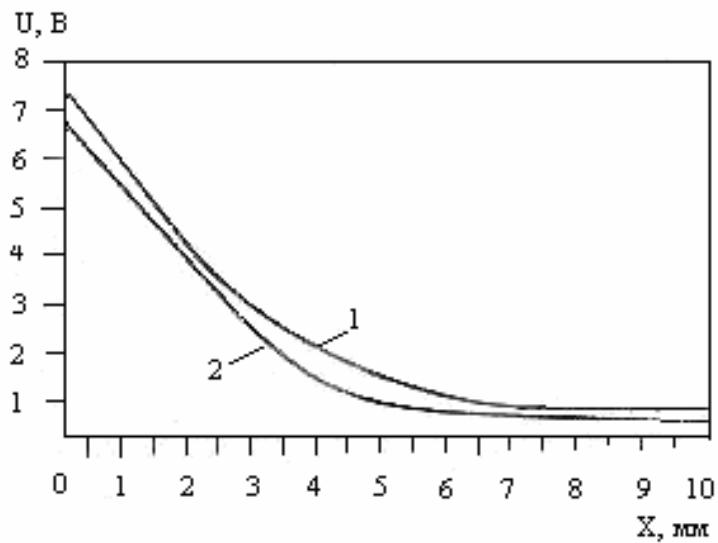


Рис. 2. Зависимость функции выхода  $U$  от расстояния  $X$  между токовихревым датчиком и ответной пластиной: 1 – теоретическая кривая  $dU/dX = -aX$ ; 2 – реальная зависимость  $U = U(x)$

Существенно, что данный измерительный комплекс обеспечивает регистрацию абсолютных перемещений конечностей в широком частотном диапазоне, однако информационно-значимый частотный интервал укладывается в интервал 0–25 Гц. Особое внимание следует обратить на низкочастотный диапазон, так как в различных условиях (физиологические нагрузки, прием фармакологических препаратов) именно в диапазоне частот 0–4 Гц и 8–11 Гц происходят изменения в амплитудно-частотных характеристиках трепорограмм человека (рис. 3). Следует отметить, что первоначальные измерения трепорограмм человека [2, 7] тоже указывали на информативность низкочастотного диапазона, однако в других работах [1, 3] с использованием акселерометров и регистрации амплитудно-частотных характеристик измеряемых ускорений были выведены другие частотные диапазоны в областях, превышающих 10 Гц. Эти авторы уделяли внимание частотному диапазону трепорограммы более 10 Гц, однако никаких значимых результатов в данном диапазоне не было получено. Есть попытки сравнения количественных показателей суммарных амплитуд двух областей – низкочастотной и высокочастотной [8]. Действительно, у человека при изменении его физиологического статуса могут наблюдаться различия между этими частотными интервалами, но эти различия связаны в большей степени с изменениями в низкочастотном диапазоне.

Исследования амплитудно-частотных характеристик микроперемещений конечности человека позволяют сделать вывод о существенной значимости анализа треморограмм именно в частотном диапазоне 0–15 Гц, тем самым доказывая возможность выделения характерных частот (в области низкочастотного диапазона), которые значимо могут представлять физиологические характеристики конкретного человека и его реакцию на те или иные внешние воздействия. Такой результат находится в некотором противоречии с результатами работ [1, 3, 8], в которых высказываются предположения о статистическом характере возникновения и существования тремора у человека.

Результаты исследований показывают, что тремор по своей природе действительно носит стохастический характер, но суперпозиция нескольких временных отрезков у одного и того же человека (при непрерывной регистрации тремора) и ее амплитудно-частотный анализ позволяет выделить определенные (характерные) частоты, которые свойственны именно данному человеку в данных физиологических условиях.

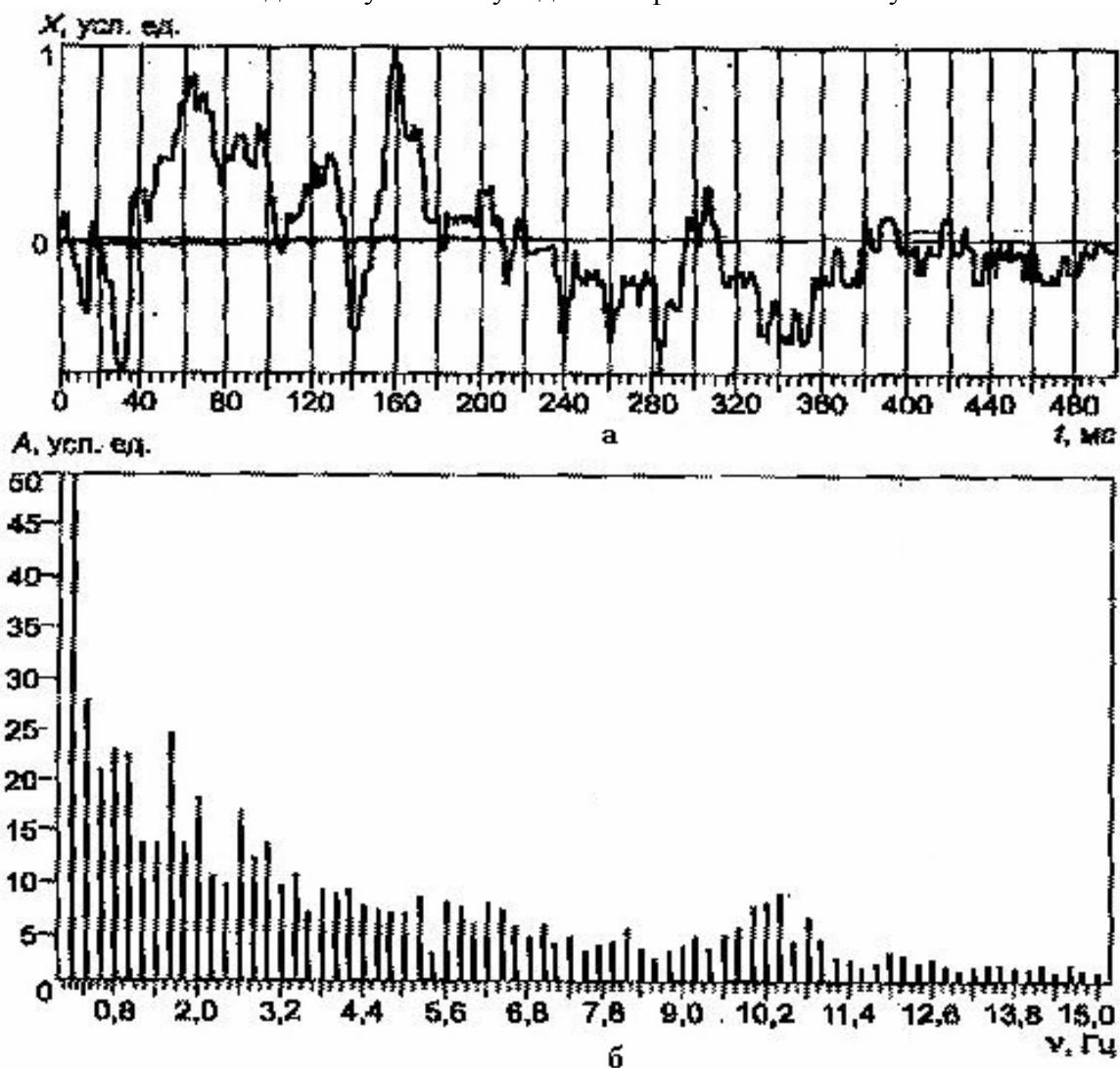


Рис. 3. Треморограмма и спектрограмма испытуемого:  
а – нативная треморограмма (колебания пальца испытуемого относительно условного нуля), по оси абсцисс – время в миллисекундах, по ординате – отклонение пальца испытуемого в условных единицах; б – спектрограмма треморограммы (А – амплитуда колебаний определенной частоты, усл. ед.,  $v$  – частота тремора, Гц)

Вышеописанные принципы и результаты исследований дают право сделать вывод о возможности использования непроизвольных движений конечностей человека (тре-

мора) в качестве параметра, однозначно характеризующего человека, в системах биометрической идентификации личности пользователя информационных ресурсов. Описанный выше измерительный комплекс может быть использован как самостоятельное устройство для идентификации личности, а также в совокупности с датчиком, основанном на измерении любой другой (статической или динамической) биометрической характеристики. Использование комплексных датчиков, анализирующих статические и динамические биометрические параметры, ведет к повышению надежности устройства, а также определяет устойчивость к муляжам и имитаторам.

### **Литература**

1. Антонец В.А., Ковалева Э.П. // Биофизика. 1996. Т.41. № 3.
2. Гурфинкель В.С. и др. Анализ физиологического тремора с помощью универсальной вычислительной машины. / Модели структурно-функциональной организации некоторых биологических систем. М.: Наука, 1966.
3. Анохин П.К. Очерки по физиологии функциональных систем. М.: Наука, 1975.
4. Еськов В.М., Папшев В.А., Еськов В.В., Жарков Д.А. Измерение биомеханических параметров тремора конечностей человека. // Измерительная техника. 2003. №1. С. 61.
5. Еськов В.М., Филатова О.Е., Папшев В.А. Сканирование движущихся поверхностей биологических объектов. // Измерительная техника. 1996. №5. С. 66.
6. Еськов В.М., Филатова О.Е., Папшев В.А., Козлов А.П. // Измерительная техника. 1996. №4. С. 58.
7. Шик М.Л., Орловский Г.Н., Северин Ф.В. //Биофизика. 1966. №11. С. 879.
8. Серебрякова Н.Г. Динамика спектральной структуры микродвижений при кинезотерапии начальных стадий искривления позвоночника: Автореферат. М., 1995.

# АДСОРБИРУЮЩИЕ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ТЕТРАЗОЛИЛАКРИЛАТНЫХ СОПОЛИМЕРОВ И СТЕКЛЯННЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ

## М.В. Успенская

Получены и исследованы композиции на основе стеклянных микросфер и тетразолилакрилатных сополимеров, изучено влияние неорганического наполнителя и условий синтеза материала на физико-механические характеристики.

### Введение

Стеклянные наполнители являются хорошо известным материалом, производимый в различных странах мира [1, 2]. Современные технологии позволяют получать стеклосыпучие порошки из тонкостенных стеклянных частиц сферической формы диаметром 10–200 мкм и более. Широкое использование этих материалов дает их сферическая форма, малая плотность, достаточная прочность и высокая адгезия к большинству полимеров. Хотя стеклянные микросфера и являются дорогим наполнителем, однако его применение достаточно выгодно. Так, использование стеклянных микросфер в количестве до 30 мас% в составе сополимера за счет низкой плотности существенно снижает стоимость единицы объема материала [3].

Супервлагоадсорбенты – сшитые сополимеры, способные к поглощению большого количества дистиллированной воды (до 2000 г воды на 1 г сухого полимера) и слабоконцентрированных водных растворов солей моновалентных металлов (до 500 г/г). Одним из существенных недостатков данного материала является отсутствие возможности изготовления изделий заданной формы. Ранее нами было показано [5], что использование стеклянных наполнителей в акрилатных влагоадсорбентах позволяет получать материалы с высокими прочностными характеристиками при сохранении высокого значения равновесной степени набухания в водных растворах.

Публикации, касающиеся композиций на основе тетразолилакрилатных сополимеров и стеклянных наполнителей, немногочисленны [5]. Именно поэтому целью данной работы является получение и исследование условий синтеза и свойств композиций на основе тетразолилакрилатных сополимеров и стеклянных микросфер.

### Экспериментальная часть

Композиции на основе тетразолилакрилатных сополимеров и наполнителей синтезировали в водной среде радикальной полимеризацией при температуре 30 °С. Стеклянные микросфера (СМФ) в количестве 10–50 мас% к акриловой кислоте (АК) вносили в приготовленную реакционную смесь после добавления инициатора – персульфата аммония (ПСА). СМФ были предоставлены ООО «Стекловолокно» (г. Новгород) и представляли собой аппретированные кремнийорганическими соединениями стеклянные частицы с диаметром 50–200 мкм и плотностью 300 кг/м<sup>3</sup>.

В качестве реагентов использовали натриевую соль АК и 5-винилтетразола (ВТ), а также N,N-метиленбисакриламид в качестве сшивающего агента (МБАА). Степень нейтрализации реакционной смеси гидроксидом натрия ( $\alpha$ ) составляла 0,5–0,9. Доля мономеров в мономерной смеси была 20–40 мас%. Концентрация ВТ варьировалась от 0 до 50 мас%, концентрация ПСА – 1 мас%, концентрация МБАА – 0,2–0,5 мас%. Влагосодержание полученных материалов варьировалось в интервале 20–50 мас%. Содержание воды было установлено по потере массы на кривых ТГ в области температур 80–150 °С.

Синтезированные сополимеры помещали в дистиллированную воду для удаления золь-фракции. Равновесное набухание гелей и кинетику процесса набухания изучали стандартным гравиметрическим методом. Степень равновесного набухания рассчитывали по уравнению

$$Q = (m_h - m_c) / m_c,$$

где  $m_h$  – масса набухшего образца, г,  $m_c$  – масса высушенного образца, г. Исходное влагосодержание геля определяли высушиванием аналогичного образца навески гидрогеля до постоянной массы при 80 °C:

$$\gamma = (m_0 - m_c) / m_0,$$

где  $m_c$  – масса высушенного до постоянной массы образца, г;  $m_0$  – исходная масса образца, г. Для получения надежных результатов проводили серию параллельных опытов: при измерении равновесного набухания – 4 опыта, при измерении влагосодержания – 3 опыта.

### Обсуждение результатов

В табл. 1 представлены условия синтеза тетразолилакрилатных композиций со стеклянными стеклосферами, а в табл. 2 – зависимости равновесной степени набухания от состава композиции.

Номер образца	Соотношение АК:ВТ	$\alpha$	Модуль ванны, мас.%	[ПСА], мас.%	[МБАА], мас.%	[СМФ], мас.%	Размер частиц, мкм
1	100: 0	0,9	25	1	0,4	15	100 – 200
2	100:0	0,9	20	1	0,5	30	100 – 200
3	100:0	0,9	25	1	0,5	15	50 – 100
4	100:0	0,9	25	1	0,5	15	50
5	50:50	0,3	40	1	0,3	30	50
6	50:50	0,9	33	1	0,3	15	50
7	100:0	0,5	30	1	0,25	30	50
8	100:0	0,3	30	1	0,3	15	50
9	100:0	0,9	40	1	0,4	15	50

Таблица 1. Условия синтеза композиций на основе тетразолилакрилатных сополимеров и стеклянных микросфер

Номер образца	Соотношение АК:ВТ	[МБАА], мас.%	[СМФ], мас.%	Размер частиц, мкм	Q, г/г	$\gamma$ , %
1	100: 0	0,45	15	100 – 200	230	41
2	100:0	0,5	30	100 – 200	50	28
3	100:0	0,5	15	50 – 100	140	36
4	100:0	0,5	15	50	60	45
5	50:50	0,3	30	50	130	31
6	50:50	0,3	15	50	20	28
7	100:0	0,25	30	50	680	35
8	100:0	0,3	15	50	170	42
9	100:0	0,4	15	50	60	46

Таблица 2. Влияние состава композиции на значения равновесных степеней набухания (Q, г/г) и влагопоглощение ( $\gamma$ , %) при температуре 18 °C.

Как видно из табл. 1 и 2, значения исследованных физико-химических свойств композиций существенно зависят от условий синтеза материала. Показано, что при увеличении размера частиц при прочих равных условиях (образцы 1, 3, 4) происходит увеличение значений равновесных степеней набухания композиций в воде в 2–3 раза. Это явление можно объяснить увеличением свободного объема при увеличении размера частиц.

Влияние размера частиц стеклянного наполнителя неоднозначно. Выявлено, что увеличение содержания 5 – винилтетразола в мономерной смеси и, соответственно, в составе сополимера приводит к уменьшению значений равновесной степени набухания и влагопоглощения (см. образцы 6 и 8). Этот факт объясняется увеличением частоты сетки, которая в данном случае имеет не только химическую, но и физическую природу благодаря наличию молекул ВТ, содержащего мономерные фрагменты, ассоциированные водородными связями, звенья с заряженными тетразольными циклами, а также карбоксильные группы АК, участвующие в образовании водородной связи с протоном тетразольного кольца 5-винилтетразола. Суммарное содержание таких ассоциатов может составлять до 70% от общего содержания ВТ в сополимере.

Влияние на физико-химические свойства полученных композиций оказывает и модуль ванны. При сравнении значений равновесной степени набухания композиций 1 и 9 видно, что наибольшие значения наблюдаются при исходной концентрации мономеров в реакционной смеси 25–30 мас%. Увеличение модуля ванны приводит к высокой скорости регенерации макрорадикалов, в связи с этим молекулярная масса звена между узлами сетки резко уменьшается, что приводит к уменьшению набухания композиции в дистиллированной воде. Аналогично, при отсутствии достаточных контактов между одиночными макрорадикалами возможно образование трехмерных агрегатов, состоящих из ограниченного числа макромолекул, или сшивание одиночных макромолекул за счет реакций между группами одной и той же макромолекулы («сама на себя»). Вместо непрерывного пространственного остова и однородного сплошного геля возникает тонкая дисперсия гель-частиц или свернутых и зафиксированных в этом состоянии одиночных макромолекул, вследствие чего значение равновесной степени набухания композиции уменьшается.

Концентрация сивающего агента существенно влияет на процесс сорбции. При увеличении концентрации N,N-метиленбисакриламида в составе сополимера увеличивается густота сетки, в результате чего значение сорбции уменьшается (образцы 7–9).

## Заключение

Нами были синтезированы и исследованы композиции на основе тетразолилакрилатных сополимеров и стеклянных наполнителей. Введение стеклянных микросфер позволяет получать материалы с новыми эксплуатационными характеристиками, способными не только сорбировать воду, но при этом и сохранять геометрическую форму изделия. Показано, что условия синтеза существенным образом влияют на физико-химические свойства новых композиций.

## Литература

1. Асланова М.С., Стеценко В.Я., Шустрос А.Ф. Полые неорганические микросфера. // Химическая промышленность за рубежом: обзор информ. НИИТЭХИМ. 1981. С. 33–51.
2. Наполнители для полимерных композиционных материалов// Справочное пособие: пер. с англ. М.: Химия, 1981. 116 с.

3. Костовская Е. И., Сутарева Л. В., Подъячева Т. И. Производство и применение в лакокрасочных материалах техногенных наполнителей. // Лакокрасочные материалы. 1990. С. 29–33.
4. Успенская М.В., Сиротинкин Н.В., Масик И.В. Композиции на основе тетразоли-лакрилатных сополимеров и полых стеклосфер. // ЖПХ. 2004. Т. 77.№ 10. С. 1719–1721.
5. Успенская М.В., Кабакова М.М., Шарапов С.В., Сиротинкин Н.В. Прочные трудно-горючие супервлагоадсорбенты. // Материалы V и VI Всероссийских научно-технических конференций «Теплофизика процессов горения и охрана окружающей среды», Рыбинск, РГАТА, 2004. С. 177–178.

# ОБЗОР МЕТОДОВ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ КОРПОРАТИВНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СЕТИ

## Г.С. Иванов

Дан обзор и классификация методов биометрической идентификации личности пользователя корпоративной информационной сети. Показаны принципы, на которых базируются методы биометрической идентификации. Отмечены достоинства и недостатки каждого из представленных методов, а также указаны величины ошибок.

На сегодняшний день биометрия как научная дисциплина имеет ряд практически независимо развивающихся направлений, каждое из которых имеет свои предпочтительные технические приложения. В исследованиях по биометрической тематике активное участие принимают десятки научных центров при университетах, ряд правительственные организаций ([www.biometrics.org](http://www.biometrics.org)) и сотни коммерческих фирм ([www.biometricgroup.com](http://www.biometricgroup.com)). Сформировался специфический рынок биометрических аппаратных устройств и программных продуктов, а также услуг по поддержке, тестированию и адаптации этих биометрических продуктов.

Существующие продукты следует разделить на две ветви. К первой ветви следует отнести большую группу биометрических продуктов, построенных на анализе статических образов личности, данных ей от рождения и хорошо наблюдаемых окружающими.

Ко второй, принципиально иной ветви биометрических продуктов следует отнести устройства и программные средства, построенные на анализе динамических образов личности. Динамические образы личности отражают особенности характерных для нее быстрых подсознательных движений в процессе воспроизведения контрольного слова рукописным почерком или в процессе произнесения контрольного слова голосом пользователя.

Следует иметь в виду, что статическая и динамическая биометрии – это две взаимно дополняющие друг друга ветви. Основным преимуществом статической биометрии является ее относительная независимость от психологического состояния пользователей, малые затраты усилий пользователей и, как следствие, возможность организации биометрической идентификации больших потоков людей.

### **Идентификация личности по рисунку сосудов глазного дна**

Одним из первых и самых надежных методов идентификации личности является использование рисунка кровеносных сосудов глазного дна. Вены и артерии, снабжающие глаз кровью, хорошо видны при подсветке глазного дна внешним источником света. Саймон и Голдштейн в 1935 году доказали уникальность дерева кровеносных сосудов глазного дна для каждого конкретного индивидуума. Процедура идентификации личности сводится к тому, что человек наблюдает сквозь специальный окуляр удаленную световую точку, при этом осуществляется инфракрасная подсветка его глазного дна, и на нем выделяется дерево кровеносных сосудов. Далее оно сравнивается с эталоном. Ошибки метода обусловлены отклонениями головы испытуемого от эталонного и неверной фокусировкой им взгляда на удаленном источнике света. По данным Сандинской национальной лаборатории (США), ошибки первого рода для метода составляют 0,4%. Ошибки второго рода практически невозможны. Отсутствуют данные о трудностях изготовлению муляжа, способного обмануть подобные биометрические устройства.

## **Идентификация личности по радужной оболочки глаза**

Уникальность рисунка радужной оболочки обусловлена генотипом личности, и существенные отличия радужной оболочки наблюдаются даже у близнецов. Обнаружено, что при ряде заболеваний на радужной оболочке появляются характерные пигментные пятна и изменения цвета. Для ослабления влияния состояния здоровья на результаты идентификации личности в технических системах используются только черно-белые изображения высокого разрешения. Уникальность рисунка радужной оболочки глаза позволяет фирмам выпускать целый класс весьма надежных систем для биометрической идентификации личности. Этот класс систем захватывает видеоизображение глаза на расстоянии 20–30 сантиметров от видеокамеры, осуществляет автоматическое выделение зрачка и радужной оболочки. Ошибки второго рода для этого метода составляют величину порядка 0,0001%.

## **Идентификация личности по особенностям геометрии кисти руки**

Системы идентификации по силуэту кисти руки появились одними из первых и начали серийно выпускаться фирмой Idenmat (США) более 20 лет назад. С точки зрения компактности образа этот класс систем является самым экономичным. При хранении информации только о длине и ширине пальцев требуется всего 9 байт. Естественно, что для систем, учитывающих только длину и ширину пальцев, может быть легко изготовлен картонный муляж руки оригинала. Более сложными являются системы, дополнительно измеряющие профиль руки. Данные о 3D геометрии руки получают путем использования одной телевизионной камеры и инфракрасной подсветки руки под разными углами. Последовательное включение нескольких подсвечивающих светодиодов дает теневые варианты проекций трехмерной геометрии кисти руки, содержащие информацию о ее объеме. Использование подобного технического решения не позволяет выполнять устройства малогабаритными, так как требуется выносить источники подсветки на расстояние 10–15 сантиметров. Ошибки первого и второго рода для современных биометрических устройств этого класса составляют менее 0,2%. Системы этого класса не предъявляют особых требований к чистоте, влажности, температуре рук.

## **Идентификация личности по папиллярному рисунку пальцев руки**

Кожа человека состоит из двух слоев, при этом нижний слой образует множество выступов, в вершине которых имеются отверстия выходных протоков потовых желез. На основной части кожи выступы располагаются хаотично, и они трудно наблюдаются. На отдельных участках кожи конечностей папилляры строго упорядочены в линии (гребни), образующие уникальные папиллярные узоры. Идентификация личности на основе папиллярных рисунков пальцев рук предложена двумя авторами, Г. Фулдсом и В. Гершелем, и описана в статье авторитетного английского журнала «Nature» в 1880 году. Метод идентификации широко распространен в криминалистике.

Системы дактилоскопической идентификации личности снимают с помощью сканера папиллярный узор с одного из пальцев заявителя прав доступа и сравнивают его с эталонным рисунком. Объем хранимой эталонной информации может быть существенно уменьшен, если осуществить классификацию на характерные типы папиллярных рисунков и выделить на отпечатке характерные микроособенности, представляющие собой начала (окончания) папиллярных линий или их слияния (разветвления). Выделяют три типа папиллярных рисунков (дуговые, завитки, круговые) и два типа макроособенностей (дельты и центры).

По результатам независимого тестирования ошибки первого рода для систем этого класса составляют от 10% до 20%, если учитывать неблагоприятные случаи сухой кожи, а также включать в состав группы тестирования лиц с плохо выраженными папиллярными рисунками.

### **Идентификация личности по индивидуальным особенностям геометрии лица**

Одним из перспективных направлений развития технологии биометрической идентификации личности является использование индивидуальных особенностей геометрии лица. Принцип работы устройств этого класса крайне прост: миниатюрная видеокамера вводит изображение лица находящегося перед компьютером человека. Программное обеспечение сравнивает введенный портрет с хранящимся в памяти эталоном. Некоторые системы дополнительно осуществляют архивирование вводимых изображений для возможного в будущем разбора конфликтных ситуаций. Весьма важным является также то, что этот класс биометрических систем потенциально способен осуществлять непрерывную идентификацию (аутентификацию) пользователя компьютера в течение всего сеанса его работы. Основными проблемами, с которыми приходится сталкиваться разработчикам этого класса биометрических систем, являются изменение освещенности, вариации положения головы пользователя, выделение информативной части – портрета (гашение фона). С этими проблемами удается справиться, автоматически выделяя на лице особые точки и затем измеряя расстояния между ними. На лице выделяются контуры глаз, бровей, носа, подбородка. Расстояния между характерными точками этих контуров образуют весьма компактный эталон конкретного лица, легко поддающийся масштабированию. Близнецы системами этого класса не различаются.

Следует подчеркнуть, что задача оконтуривания характерных деталей лица легко может быть решена для плоских двухмерных изображений с фронтальной подсветкой, но такие биометрические системы могут быть обмануты плоскими изображениями лица-оригинала. Для двухмерных систем изготовление муляжа-фотографии не является сложной технической проблемой. Существенные технические трудности при изготовлении муляжа возникают при использовании трехмерных биометрических систем, способных по перепадам яркости отраженного света восстанавливать трехмерную геометрию лица. Такие системы способны компенсировать неопределенность расположения источника освещенности по отношению к идентифицируемому лицу, а также неопределенность положения лица по отношению к видеокамере. Обмануть этот класс систем можно только объемной маской, точно воспроизводящей трехмерную геометрию лица-оригинала. Хорошо работающих трехмерных систем пока не существует.

### **Идентификация личности по термографическому изображению лицевых артерий и вен**

Проблемы идентификации человека по лицу существенно упрощаются при переходе наблюдений в дальний инфракрасный диапазон световых волн. Предложено осуществлять термографию идентифицируемого лица, выявляющую уникальность распределения артерий на лице. Проблема подсветки для этого класса биометрических устройств не существует, так как они воспринимают только температурные перепады лица и могут работать в полной темноте. На результаты идентификации не влияют перегрев лица, его переохлаждение, естественное старение личности, пластические операции, так как они не изменяют внутреннее расположение сосудов. Методу лицевой термографии доступно различение близнецов, кровеносные сосуды на их лицах имеют доста-

точно существенные различия. Метод рассчитан на использование видеокамеры дальнего инфракрасного диапазона.

### **Идентификация личности по венам руки**

На рынке биометрии присутствуют устройства, построенные на анализе индивидуальности расположения вен руки. Используется рисунок вен тыльной стороны кисти руки, сжатой в кулак. Наблюдение рисунка вен осуществляется камерой при инфракрасной подсветке. После ввода изображения осуществляется его бинаризация, подчеркивающая вены.

### **Другие статические методы идентификации личности**

Одним из активно развивающихся направлений идентификации личности является использование индивидуальных особенностей генетического кода личности. Сегодня методы тонкого анализа генетического кода применяются только в криминалистике, так как они пока не позволяют получать результат в реальном масштабе времени.

### **Идентификация личности по рукописной подписи и динамике ее воспроизведения**

Этот способ идентификации личности построен на том, что автор придумывает себе факсимиле и хорошо отрабатывает его путем тренировок. Желательно, чтобы авторское факсимиле имело существенные отличия по форме от классического написания букв в виде дополнительных элементов (росчерков, возвратов, наложения букв). Имеет смысл проблему идентификации автора по его факсимильной подписи рассматривать как две независимые проблемы:

- идентификация автора только по следу пера автографа или по «мертвой» статической подписи, уже присутствующей на проверяемом документе;
- идентификация автора по динамике воспроизведения автором «живой» подписи, вводимой им в компьютер в момент своей идентификации при возможности наблюдения индивидуальных особенностей, привычных для автора подсознательных движений.

Отмеченные выше две постановки задачи имеют весьма существенные отличия, но обе эти задачи могут решаться параллельно и независимо. В первой постановке задачи речь идет о сравнении изображений, воспроизведенных ранее в неизвестной последовательности. Во второй постановке задачи имеются данные о параметрах колебания пера автора при воспроизведении им подписи в трехмерном пространстве. Если пользоваться декартовой системой координат  $(X, Y, Z)$ , то данные о динамике воспроизведения подписи получают в виде двух функций времени – колебаний пера в плоскости графического планшета  $X(t)$ ,  $Y(t)$  и еще одной функции – вариации давления пера на графический планшет  $Z(t)$ . Сразу же следует отметить то, что первая постановка задачи очень сложна для уровня развития современных информационных технологий. На сегодня известные технические решения первого варианта постановки задачи по вероятностным характеристикам существенно хуже, чем статистика работы опытных людей (экспертов). Именно по этой причине фирмы-производители не дают статистических данных об ошибках первого и второго рода для идентификации автора только по «мертвому» статическому образу его подписи.

Иначе обстоит дело с другой постановкой задачи. Во второй постановке задачи решающая ее вычислительная машина имеет существенно больше информации в сравнении с экспертом. В итоге системы идентификации личности, анализирующие дина-

мику воспроизведения автографа, по своим статистическим характеристикам оказываются существенно лучше экспертов. Эксперт просто не обладает подобной динамической информацией, и только по этой причине он оказывается хуже вычислительной машины. Практически все существующие сегодня коммерческие системы идентификации личности этого класса работают с «живыми» подписями и построены в основном на анализе динамики воспроизведения подписи. Однако в этих системах могут присутствовать и фрагменты более сложной ветви анализа статических изображений подписи.

Коммерческие системы следует разделить на одно-, двух- и трехкоординатные. Соответственно, эти системы отличаются тем, что анализируют одну кривую, пару кривых или полную тройку кривых  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$ . Однокоординатные системы могут быть построены путем учета любой из этих временных функций, обеспечивая вероятности ошибок первого и второго рода на уровне 0,1. Двухкоординатные системы используют любую пару функций времени из тройки  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  и на сегодняшний день позволяют достичь уровня вероятности ошибок порядка 0,01. Наиболее сложные системы используют полную тройку функций, обеспечивая уровень вероятностей ошибок первого/второго рода порядка 0,003.

Следует отметить, что некоторые из систем биометрической идентификации по подписи используют не сами проекции функций  $X(t)$ ,  $Y(t)$ ,  $Z(t)$  на оси координат, а их первую или вторую производную. Последнее обусловлено только типом используемого датчика, чувствительного к производной, и практически не влияет на качество и объем исходной информации. Искусственное наращивание числа анализируемых функций за счет измерения их самих и их же производных нецелесообразно, так как все линейные преобразования первообразных дают сильно коррелированные данные. В частности, корреляция биометрических данных, полученных из первообразной  $X(t)$ , и биометрических данных, полученных из ее производной  $dX(t)/dt$ , близка к единице.

Следует отметить, что ошибка первого рода или ложный отказ подлинному автору с вероятностью 0,01 – это вполне приемлемая характеристика для требований сегодняшнего дня. Иначе обстоит дело с ошибками второго рода или ложным пропуском злоумышленника. Для ряда практических приложений вероятность ошибок второго рода 0,01 является неприемлемо большой величиной. Для снижения этой ошибки в  $10^4$ – $10^6$  раз прибегают к идентификации личности по динамике воспроизведения биометрического пароля. В качестве биометрического пароля обычно используется некоторое секретное слово-пароль. Автором сохраняется в секрете как само слово-пароль, так и его личные (авторские) особенности написания. В этом случае для слова-пароля, содержащего от 5 до 10 букв, ошибка второго рода снижается в  $10^4$ – $10^6$  раз. Большего снижения ошибки второго рода можно добиться, используя в качестве биометрического пароля слова, не имеющие смысла, но этот путь сопряжен с дополнительными трудностями запоминания слов из случайного сочетания букв.

## **Идентификация личности по клавиатурному почерку**

Быстрого клавиатурного ввода информации удается достичь за счет использования всех пальцев обеих рук, при этом у каждого человека появляется свой уникальный клавиатурный почерк. Следует подчеркнуть, что уникальный личный почерк вырабатывается и при ежедневном решении более простой задачи передачи информации кодом Морзе, что использовалось ранее для идентификации личности телеграфиста по его почерку. Традиционно ограничение доступа к информации осуществляется по паролям, однако если пароль увеличить, то появляется возможность наблюдать при вводе пароля характерный для пользователя клавиатурный почерк.

Например, в качестве пароля используется слово «Пароль». При вводе подобной парольной фразы биометрическая система фиксирует время нажатия каждой клавиши и

интервал времени между нажатием очередной клавиши и отпусканием предыдущей клавиши. График соотношения интервалов времени нажатия и отпускания клавиш для слова “Пароль” приведен на рис. 1.

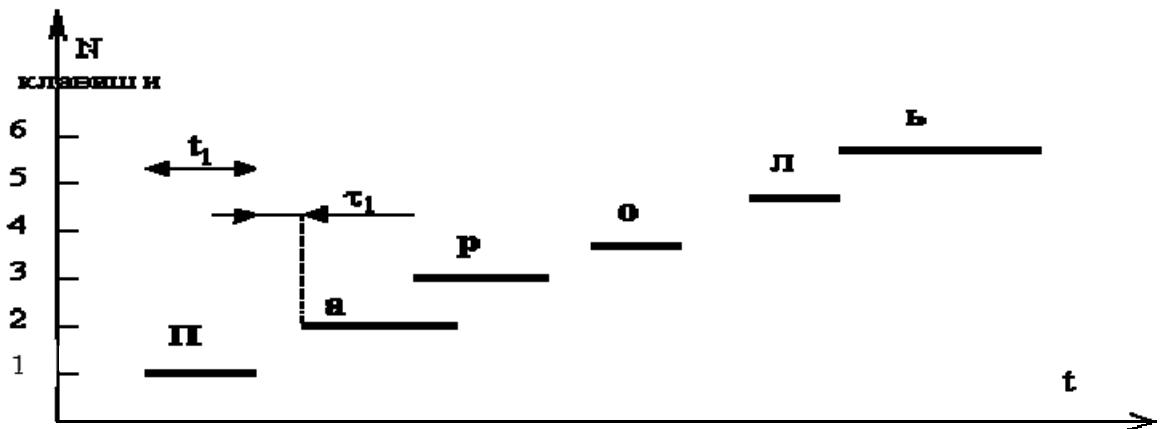


Рис. 1. Временная диаграмма ввода слова “Пароль”

Из рис. 1 видно, что времена нажатий клавиш  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N$  различны и, соответственно, значения этих параметров могут быть использованы для выявления характерных особенностей индивидуального клавиатурного почерка пользователя. Кроме того, могут быть использованы в качестве контролируемых параметров интервалы времени между нажатием соседних клавиш  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_{N-1}$ .

Контролируемые параметры  $t_k$  и  $\tau_k$  существенно зависят от того, сколько пальцев использует при наборе пользователь, от характерных для пользователя сочетаний движений различных пальцев руки и от характерных движений рук при наборе. В частности, если заставить пользователей работать одним пальцем одной руки, то клавиатурный почерк практически полностью теряет индивидуальность. В этом случае времена нажатия клавиш для разных людей перестают отражать их индивидуальность. Интервалы между нажатиями становятся пропорциональны расстоянию между клавишами, а перекрытие нажатий соседних клавиш становится невозможным. С другой стороны, по мере увеличения навыков работы с клавиатурой и по мере перехода к слепому набору всеми пальцами обеих рук существенно растет индивидуальность клавиатурного почерка любого из пользователей.

Весьма важной характеристикой этой технологии биометрической идентификации является длина парольной фразы. Практика показывает, что парольная фраза должна быть легко запоминаемой и содержать от 21 до 42 нажатий на клавиши. При синтезе парольной фразы допустимо использование слов со смыслом из некоторого словаря. В отличие от классических паролей, при наборе длинной парольной фразы допустимы ошибки в одном или двух символах, что несколько ухудшает стойкость парольной фразы к статическому подбору, но зато значительно снижает вероятность ошибок первого рода.

Биометрический эталон ввода парольной фразы получают вычислением математических ожиданий и дисперсий контролируемых параметров. При вычислениях крайне важным является исключение из обучающей выборки плохих примеров или аномальных выбросов. Хорошие результаты получаются при использовании аппарата нечетких множеств для уменьшения неопределенности исходных данных. Пожалуй, наиболее сложным для этой технологии биометрической идентификации является вопрос о присутствии у пользователя индивидуального клавиатурного почерка.

## Идентификация личности по особенностям голоса

Идентификация личности по особенностям голоса имеет ряд привлекательных сторон. Во-первых, существует хорошо развитая телефонная сеть, во-вторых, звуковые карты фактически стали стандартным оборудованием современных персональных компьютеров.

Первые системы идентификации личности по особенностям голоса строились исходя из частотных представлений и возможностей средств аналоговой фильтрации. В основу их работы положена различная тембральная окраска голосов и индивидуальная неравномерность распределения мощности произносимой фразы по частотному спектру. Базовыми процедурами для этого класса устройств являются узкополосная фильтрация сигнала и восстановление его огибающей. В частности, подобная система фирмы Texas Instruments использует гребенку из 16 узкополосных фильтров с шириной полосы пропускания 220 Гц, равномерно накрывающей частотный диапазон от 300 до 3000. При произношении контрольной фразы система идентификации осуществляет приведение сигнала к единому масштабу амплитуд за счет работы АРУ входного усилителя. Полосовые фильтры и детекторы огибающей их откликов позволяют получить 16 функций времени, характеризующих распределение энергии звукового сигнала по частотному спектру. Функция  $A_0(t)$  описывает изменения значения энергии полного сигнала во всем диапазоне звуковых частот. При обучении система запоминает наиболее вероятные эталонные значения функций  $A_k(t)$  для конкретной личности и допустимые коридоры отклонений для этих функций.

Одной из проблем, возникающих при идентификации личности по голосу, является то, что часть участков  $A_k(t)$ , соответствующих шипящим звукам, бесполезна. Более того, фрагменты кривых  $A_k(t)$ , соответствующие шипящим звукам, должны обязательно исключаться из данных, по которым принимается решение, так как их учет может только ухудшить качество идентификации. О регистрации на входе устройства звуковой фонемы судят по наличию существенного значения отклика канала  $A_0(t)$ , при этом, если на входе устройства присутствует шипящий звук, то его спектр оказывается равномерным или  $A_k(t) \approx A_0(t)/16$ . Шипящие звуки являются модулированным по амплитуде белым шумом и легко распознаются. Все другие звуки (не являющиеся шипящими) обязательно имеют ярко выраженную неравномерность спектральной характеристики, и на эту неравномерность существенно влияют индивидуальные особенности мышечной активности речевого тракта личности.

По мере развития средств вычислительной техники и методов цифровой фильтрации интерес к частотным методам идентификации изменяется на интерес к системам, использующим линейные предсказатели речевого сигнала. Системы идентификации с линейным предсказанием речи используют описание сигнала во временной области. В основу кодирования речи методом линейного предсказания положена волновая структура речевого сигнала, особенно хорошо наблюдаемая при произношении гласных.

Метод линейного предсказания построен на аппроксимации соседних волн в звуковой пачке переходным процессом некоторого линейного цифрового фильтра. При описании звукового сигнала методом линейного предсказания исходный сигнал разбивается на отдельные интервалы анализа фиксированной длины (обычно длина интервала анализа составляет 20 мс). Далее осуществляют определение типа звука внутри интервала анализа (шум или тональный звук). Если внутри интервала находится шумовой участок, то определяются только его энергетические параметры  $A_0(t)$ . Если внутри интервала анализа присутствует тональный фрагмент, то сигнал дополнительно описывают путем задания коэффициентов линейного предсказателя (линейного цифрового фильтра) и задания периода импульсов основного тона, возбуждающих переходные процессы на выходе линейного предсказателя.

В качестве недостатка биометрических систем идентификации личности по голосу необходимо отметить, прежде всего, то, что парольную фразу трудно сохранить в тайне. Современные средства акустического прослушивания позволяют достаточно успешно осуществлять несанкционированное копирование парольной фразы. Ожидается, что исключение опасности использования злоумышленниками “магнитофонов” произойдет при переходе к идентификации личности на произвольных фразах. Как потенциальное противодействие “магнитофонам” используется случайный розыгрыш парольных фраз, а также комбинирование с другими методами биометрической аутентификации. По данным независимого тестирования Сандинской национальной лаборатории, ошибки первого и второго рода составляют для голосовых систем от 2% до 1%.

## Литература

1. Беленков В.Д. Электронные системы идентификации подписей // Защита информации. Конфидент. 1997. №6. С. 39–42.
2. Белоцерковский О.М., Глазунов А.С., Щенников В.В. Компьютерное распознавание человеческих лиц. // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники. 1997. №8. С. 3–14.
3. Бочкарев С. Л., Сапегин Л. Н. Новые возможности биометрических голосовых технологий // Защита информации. Конфидент. 2003. №5. С. 34–39.
4. Дэвид Уиллис, Майк Ли. Шесть биометрических устройств идентификации отпечатков пальцев // Сети и системы связи. 1998. № 9(31). С. 146–155.
5. Иванов А.И. Биометрическая идентификация личности по динамике быстрых движений. // Специальная техника средств связи. Серия Системы, сети и технические средства конфиденциальной связи. Пенза. Выпуск 2. 1997. С. 88–93.
6. Кен Филлипс. Ваше лицо – гарант безопасности.// PCWEEK RUSSIAN EDITION, 3 июня 1997. С. 35–38.
7. Коротаев Г.А. Анализ и синтез речевого сигнала методом линейного предсказания // Зарубежная радиоэлектроника. 1990. №3. С. 31–50.
8. Рамишвили Г.С. Автоматическое опознавание говорящего по голосу. М.: Радио и связь, 1981. 224 с.
9. Рыбченко Д.Е. Критерии устойчивости и индивидуальности клавиатурного почерка при вводе ключевых фраз. // Специальная техника средств связи. Серия Системы, сети и технические средства конфиденциальной связи. Пенза, ПНИЭИ. 1997. Выпуск №2. С.104–107.
10. Рыбченко Д.Е., Иванов А.И. Анализ клавиатурного почерка аппаратом нечетких множеств для целей ограничения доступа и аудита. // Специальная техника средств связи. Серия Системы, сети и технические средства конфиденциальной связи. Пенза, ПНИЭИ. 1996. Выпуск 1. С.116–119.
11. Фунтиков В.А., Ефремов О.В., Иванов А.И. Автоматическое прогнозирование уровня безопасности // Защита информации. Конфидент. 2003. №5. С.30–33.

# ЭФФЕКТИВНОСТЬ МЕТОДОВ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТА ФАЗОВО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИСТЕМАХ РАЗЛИЧНОЙ ПРИРОДЫ

А.А. Слободов, Д.В. Кремнев, М.А. Радин, В.С. Бабкин, А.В. Мищенко

Термодинамическое моделирование состава многокомпонентных систем является важной, сложной и во многом нерешенной задачей. Разработанный метод позволяет эффективно решать ее в широком диапазоне параметров состояния без ограничений на количество фаз и компонентов системы.

## Введение

Задачи определения состава сложных (по количеству фаз и компонентов) систем при различных значениях параметров состояния чрезвычайно актуальны для самых широких классов физико-химических и технологических систем – неорганических, органических, стеклообразных и др. Существуют также обратные задачи определения параметров состояния, при реализации которых сложная система будет удовлетворять ряду требований по ее составу.

Наиболее распространенными примерами таких задач могут служить задачи определения условий проведения различных процессов, связанных с химическими и фазовыми превращениями веществ на стадии проектирования этих процессов, а также оптимизация существующих процессов. Если обобщить эти две задачи, то формулировка новой задачи примет следующий вид. Необходимо определить состав (химический и фазовый) сложной системы в широком диапазоне параметров состояния (концентраций исходных компонентов системы, температур и давлений).

Предлагаемый ниже метод, позволяющий решить эту обобщенную задачу, является наиболее перспективным вследствие его универсальности – независимости от конкретного состава систем и условий, при которых эти системы существуют.

## Решение поставленной задачи

Способ решения основан на том, что любые самопроизвольные изменения в системе сопровождаются минимизацией некоторой энергетической характеристики (той или иной – в зависимости от условий проведения процесса) системы, в результате чего она приходит к некоторому состоянию равновесия, которое соответствует искомому минимуму энергии при данных условиях. Поэтому решение задачи сводится, во-первых, к нахождению выражения зависимости энергии системы от ее состава и параметров состояния и, во-вторых, к нахождению минимума этой функции при наложении на систему (а, следовательно, и на функцию) всех необходимых ограничений.

В частности, физико-химическое термодинамическое рассмотрение приводит (при постоянстве температуры и давления) к понятию свободной энергии (энергии Гиббса) системы, которое следует использовать в качестве искомой функции.

Энергия Гиббса  $G$  системы определяется выражением:

$$G = H - T \cdot S, \quad (1)$$

где  $H$  – энталпия,  $T$  – абсолютная температура. В целом же свободная энергия Гиббса является функцией следующих переменных:

$$G = F(T, P, n_1, \dots, n_k), \quad (2)$$

где  $P$  – давление,  $n_i$  – концентрация  $i$ -го компонента системы,  $k$  – количество компонентов системы.

Следовательно, определив вид функции (2), мы можем решить поставленную задачу.

Из анализа зависимости (2) видно, что она тем сложнее, чем больше компонентов составляют систему.

В простейшем случае, для системы, состоящей из нескольких веществ, связанных одним уравнением реакций, равновесный состав системы при заданных параметрах состояния мы легко можем определить без использования вычислительной техники. Однако при увеличении числа реакций между компонентами системы сложность задачи возрастает, и уже требуется применение вычислительной техники.

В общем случае, в многокомпонентной и многофазной системе, в которой происходят химические превращения, постановка задачи сводится к следующему. Вся система определяется  $m$  независимыми базисными компонентами. В системе в результате химических и фазовых превращений образуется  $n$  составляющих веществ, из которых  $(n-m)$  – зависимые. Составляющими веществами могут быть индивидуальные вещества в различных агрегатных состояниях, а также компоненты растворов. В системе должен соблюдаться материальный баланс каждого из веществ, входящих в базис, в сумме по  $n$  составляющих веществ. В изобарных и изотермических условиях равновесие системы, как было сказано выше, характеризуется минимумом свободной энергии Гиббса.

С учетом материального баланса мы имеем систему, состоящую из трех групп уравнений и неравенств:

$$G = \sum_{i=1}^n (\mu_i^0 + RT \ln \gamma_i x_i) y_i \rightarrow \min \{y_i\}; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n a_{ij} y_i = y_j^0 \quad , j \in 1 : m; \quad (4)$$

$$y_i \geq 0 \quad , i \in 1 : n. \quad (5)$$

Здесь  $y_j^0$  – заданные мольные количества базисных элементов;  $\{a_{ij}\}_{n \times m}$  – матрица стехиометрических коэффициентов, которая выражает все компоненты системы через базис;  $y_i$  – искомые количества составляющих веществ системы;  $\mu_i$ ,  $\mu_i^0$  – химические и стандартные химические потенциалы составляющих веществ системы;  $x_i$ ,  $\gamma_i$  – концентрация и коэффициенты активности составляющих веществ системы. Неравенство (3) описывает условие неотрицательности количеств составляющих веществ в системе.

Система уравнений представляет собой задачу условной минимизации функции. Методов нахождения экстремума разработано достаточно много. Одни из них похожи, другие достаточно сильно различаются между собой. В основном эти методы используют производные (первые производные, а также производные более высоких порядков), но существуют также методы, не использующие производных. Методы различаются по скорости сходимости, по требованиям к вычислительным ресурсам, по возможности применения их в тех или иных условиях, к тем или иным функциям. В нашем случае для нахождения экстремума функции мы будем использовать модификацию метода Ньютона с регулировкой шага, основанной на принципе Голдстейна.

Однако система уравнений (3)–(5) включает в себя не только минимизируемую функцию, но и ряд условий. Для решения этой системы мы воспользуемся методом неопределенных множителей Лагранжа, который позволяет учесть ограничения с помощью дополнительных слагаемых, дополняющих минимизируемую функцию.

Соответственно, наша функция примет вид:

$$\Phi = \sum_{i=1}^n (\mu_i^0 + RT \ln \gamma_i x_i) y_i + \sum_{j=1}^m \lambda_j \left( \sum_{i=1}^n a_{ij} y_i - y_j^0 \right). \quad (6)$$

В точке минимума функции (6) ее искомые аргументы примут значения, удовлетворяющие поставленным условиям.

## Реализация метода

Описанный выше метод нахождения равновесного фазово-химического состава был реализован в виде программного продукта, который использует информацию из разработанной базы данных по термодинамическим свойствам индивидуальных химических веществ.

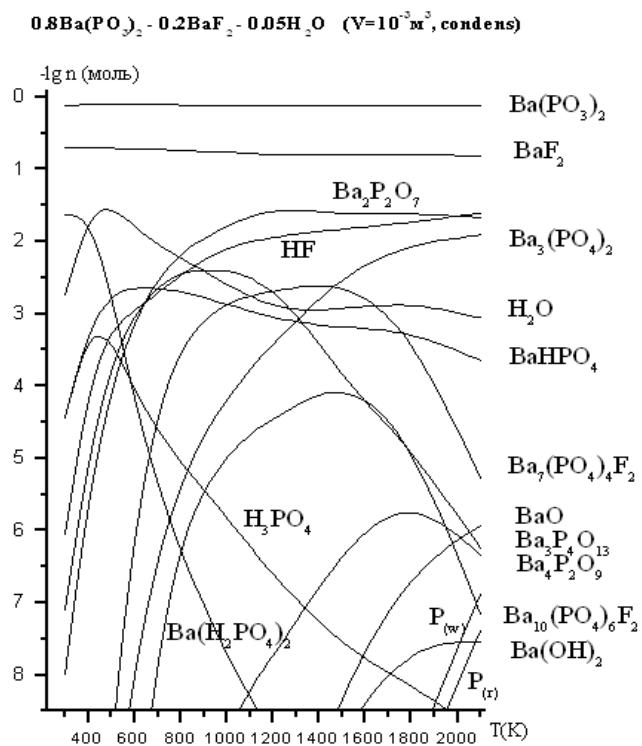


Рис.1. Влияние температуры на протекание химических превращений

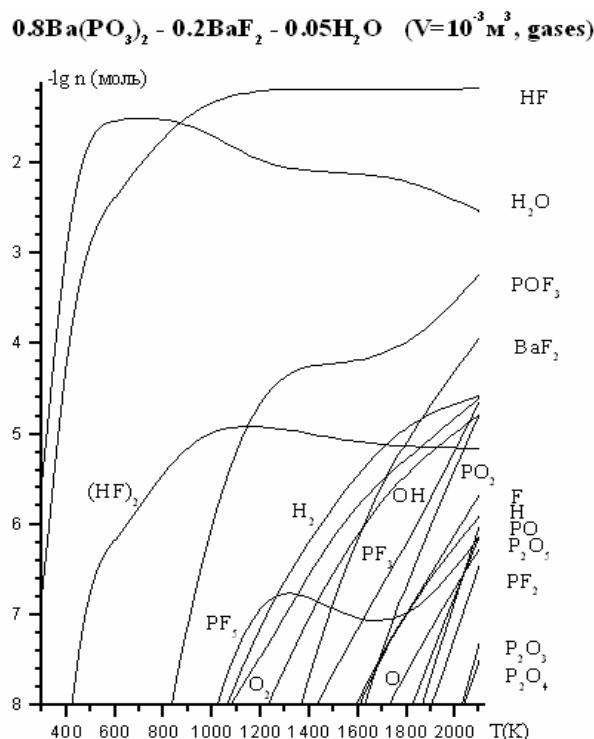


Рис. 2. Влияние температуры при улетучивании

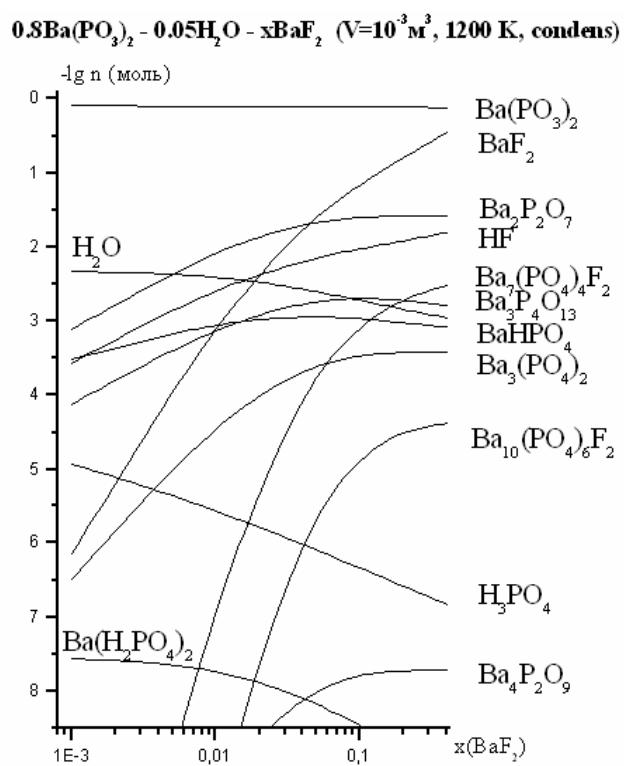


Рис. 3. Влияние фторидной составляющей на протекание химических превращений

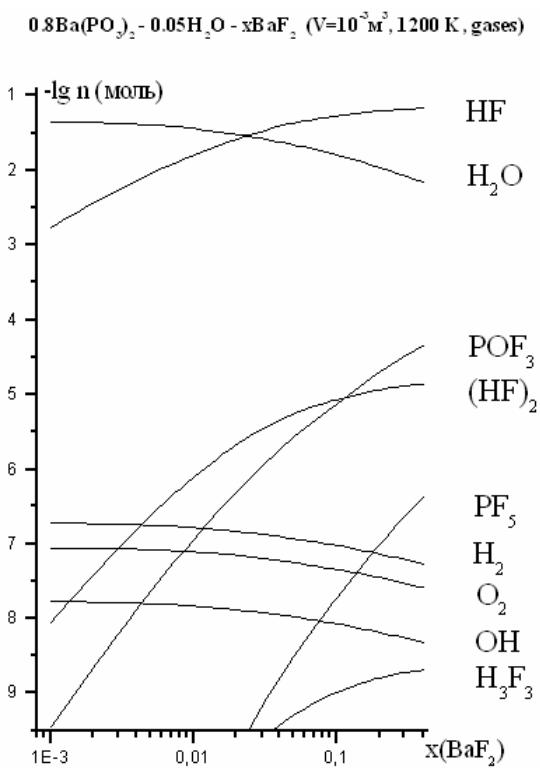


Рис. 4. Влияние фторидной составляющей при улетучивании

При помощи данного программного продукта (с привлечением разработанного банка термодинамических данных) были исследованы многокомпонентные стеклообразующие, люминофорные и другие системы, в частности, стеклообразующая система

$\text{BaO-P}_2\text{O}_5-\text{BaF}_2-\text{H}_2\text{O}$  в условиях синтеза при 298–2000° К. В работе выполнено термодинамическое моделирование физико-химических превращений как в стекломассе, так и в ходе гетерогенных процессов (например, улетучивание при варке стекла) рассматриваемых барийфосфатных системах, влияния на них изменения температуры и состава. Некоторые графические результаты расчетов представлены на рис. 1–4. Интерес к ним, как чисто теоретический, так и практический, несомненен, однако выходит за рамки настоящей работы.

### **Заключение**

Разработанный метод итерационного решения и реализующие его процедуры не имеют ограничений ни на компонентность, ни на природу исследуемых систем. Необходимые для моделирования и расчетов стандартные и высокотемпературные термодинамические характеристики веществ получены из разработанной базы термодинамических данных, основанной на экспертизе и согласовании наиболее достоверных из имеющихся литературных данных, а также расчете недостающих.

Эта методология позволяет достаточно обоснованно моделировать все стадии изготовления стекол (как и любых других систем), учитывать при этом не только химические, но и фазовые переходы – с количественным учетом побочных продуктов синтеза, покидающих реакционное пространство (т.е. тех, по которым система становится открытой). Ее реализация позволила корректно и эффективно решить поставленные задачи для различных стеклообразующих, люминофорных, водно-неорганических, органических изученных систем в широкой области составов и температур (298–2000 К).

# ПРОБЛЕМА ДОСТОВЕРНОСТИ И ПОЛНОТЫ СИСТЕМ И БАЗ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЕЩЕСТВ

А.А. Слободов, М.А. Радин, А.В. Мищенко, Д.В. Кремнев, Г.А. Маруева

Существующие системы и базы термодинамических характеристик отличаются недостаточной полнотой и согласованностью данных для широких классов веществ. Предлагаемый подход и разработанные базы данных дают основу для решения этих проблем.

## Введение

Существует множество задач, в которых требуется знание термодинамических характеристик как индивидуальных веществ, так и компонентов растворов. На сегодняшний день имеется значительное количество оригинальных исследований и справочных изданий различных стран мира, в которых приведены необходимые термодинамические данные. Однако, несмотря на то, что эти данные получены с использованием ряда высокоточных методов, они достаточно противоречивы и неполны.

В результате проведенного анализа имеющихся справочных и обзорных изданий по термодинамическим свойствам неорганических и водно-неорганических веществ, на основе которых могут быть построены требуемые базы данных, не удалось выявить источников, удовлетворяющих в достаточной степени всем требованиям, предъявляемым к таким данным. Это относится как к стандартным условиям ( $T = 298.15$  К,  $P = 1$  бар =  $10^5$  Па), так и к температурным и барическим зависимостям термодинамических функций. Более того, единичны, а чаще и вовсе отсутствуют, данные в области экстремальных значений параметров состояния.

Об особой важности точности стандартных данных и температурно-барических зависимостей говорит то обстоятельство, что даже небольшая погрешность их может привести не только к большой погрешности результатов вычислений, но и к полной бесполезности последних.

Все эти факты говорят о том, что для решения задач необходимо иметь обширную базу точных и термодинамически согласованных данных, охватывающую все вещества во всех их состояниях, которые способны реализоваться в исследуемых с помощью данного метода системах. В случае отсутствия экспериментальных зависимостей весьма перспективным (а по существу и единственным) является метод экстраполяции данных на области экстремальных значений параметров состояния.

## Аппарат термодинамического описания

Переходя к более детальному анализу и решению проблем создания термодинамических систем и баз данных, целесообразно сначала очертить круг термодинамических характеристик, необходимых для построения корректного и полного термодинамического описания произвольной физико-химической системы в допустимой области возможных ее состояний.

Следует, во-первых, отметить, что, определяя тот или иной выбор независимых параметров состояния и соответствующих характеристических функций, мы задаем и различные формы термодинамического описания системы. При этом все эти формы эквивалентны, легко трансформируются одна в другую, и любая из них в равной степени позволяет (с применением расчетного аппарата термодинамики типа и в духе уравнений Максвелла, термодинамических уравнений состояния и т.п.) исследовать различные свойства как системы в целом, так и компонентов, фаз и веществ, ее составляющих. Как с теоретических, так и с практических позиций наиболее удобным при построении такого описания является выбор давления  $P$  и температуры  $T$  в качестве неза-

висимых внешних параметров состояния. Соответствующей характеристической функцией является тогда, как известно, энергия Гиббса  $G(P, T, n)$  ( $n = \{n_i\}$  – вектор мольного состава) исследуемой системы, определяемая (в силу того, что  $P, T$  – интенсивные переменные, а  $n$  – экстенсивная переменная) значениями мольных количеств  $n_i$  и химических потенциалов  $\mu_i$  веществ, описывающих ее компонентный и фазовый состав:

$$G = \sum_{(i)} \frac{\partial G}{\partial n_i} n_i \equiv \sum_{(i)} \mu_i n_i . \quad (1)$$

В свою очередь, химический потенциал  $\mu_i(P, T)$   $i$ -го вещества определяется через его значение  $\mu_i^0(P, T)$  в так называемом стандартном состоянии:

$$\mu_i(P, T) = \mu_i^0(P, T) + RT \ln a_i , \quad (2)$$

где  $a_i$  – активность  $i$ -го вещества (относительно используемого для него стандартного состояния).

Как известно, в качестве стандарта для индивидуальных веществ обычно принимается наиболее устойчивое при данных  $(P, T)$ -условиях фазовое состояние, для компонентов растворов – как чистое вещество, так и растворенное. При этом в силу (1), (2) величины  $\mu_i^0$  суть мольные (при выборе чистого вещества в качестве стандарта) либо парциальные мольные (если стандартное состояние – раствор) энергии Гиббса  $G_i^0(P, T)$ . Поскольку для построения корректного термодинамического описания и расчета равновесий достаточно знать не полные значения  $G_i^0(P, T)$  (определить которые практически невозможно), а лишь их относительные изменения, часто в качестве требуемой «шкалы отсчета» используются функции образования соединений из соответствующих простых веществ –  $\Delta_f G^0(P, T)$  (здесь и далее индекс  $i$  вещества опущен). Более целесообразным, однако реже применяемым, представляется использование в качестве  $G^0(P, T)$  (т.е. и  $m^0(P, T)$ ) другой (также термодинамически корректной) величины:

$$\tilde{G}^0(P, T) \equiv \Delta_f G^0(P_0, T_0) + [G^0(P, T) - G^0(P_0, T_0)] , \quad (3)$$

а также аналогичного выражения для энталпии  $\tilde{H}^0(P, T)$ , где  $P_0, T_0$  – соответственно стандартные значения давления и температуры, для которых, в соответствии с принятыми в настоящее время международными соглашениями, рекомендованы величины  $P_0 = 1$  бар ( $10^5$  Па),  $T_0 = 298.15$  К. Отметим, что для давления нередко используется прежний стандарт –  $P_0 = 1$  атм = 101325 Па, для температуры (иногда) –  $T_0 = 0$  или 293.15 К.

Получение функций типа  $\tilde{G}^0(P, T)$ ,  $\tilde{H}^0(P, T)$  не требует, в отличие от  $\Delta_f G^0(P, T)$ , знания термодинамических свойств простых веществ (определяющих состав данного сложного) при  $(P, T)$ -условиях, отличных от стандартных. Поскольку температурные зависимости термодинамических свойств веществ наиболее изучены при давлениях, близких к стандартному, то потенциал  $\tilde{G}^0(P, T)$  (3) целесообразно «привязать» к значению  $P = P_0$ , представив переход из состояния  $(P_0, T_0)$  в  $(P, T)$  сначала по изобаре,  $(P_0, T_0) \rightarrow (P_0, T)$ , затем – по изотерме,  $(P_0, T) \rightarrow (P, T)$ :

$$G^0(P, T) - G^0(P_0, T_0) = [G^0(P_0, T) - G^0(P_0, T_0)] + [G^0(P, T) - G^0(P_0, T)] . \quad (4)$$

Подставляя далее (4) в (3) и используя математический аппарат термодинамики для составляющих выражения (4), после ряда преобразований несложно получить:

$$\begin{aligned} \tilde{G}^0(P, T) = & \Delta_f G^0(P_0, T_0) - S^0(P_0, T_0)(T - T_0) + \\ & + \sum_{j=1}^k \left[ T \int_{T_{j-1}}^{T_j} \frac{C_j^0(P, t)}{t} dt - \int_{T_{j-1}}^{T_j} C_j^0(P_0, t) dt + \left( \frac{T}{T_j} - 1 \right) \Delta H_j^0(P_0, T_j) \right] + \int_{P_0}^P V^0(p, T) dp , \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta_f G^0(P_o, T_o) \equiv \Delta_f G_{298}^0$ ,  $S^0(P_o, T_o) \equiv S_{298}^0$  – соответственно энергия Гиббса образования и энтропия вещества при стандартных ( $P_o=1$  бар,  $T_o=298.15$  К) условиях;  $T_j \equiv T_{tr}$ ,  $\Delta H_j^0(P_o, T_j) \equiv \Delta H_{tr}^0$  – соответственно температуры и стандартные тепловые эффекты фазовых (полиморфных, агрегатных и др.) переходов вещества, если таковые имеются;  $C_j^0(P_o, t) \equiv C_{Pj}^0(t) = \partial H^0 / \partial t$  – температурные зависимости стандартных изобарных теплоемкостей для каждой из  $k$  фаз вещества, образующихся на интервалах  $[T_{j-1}, T_j]$ , ( $j \in 1:k$ ;  $T_0 = T_o$ ,  $T_k = T$ );  $V^0(p, T)$  – барическая зависимость стандартного мольного объема на интервале  $[P_o, P]$  при температуре  $T$ . При этом последнее слагаемое в (5) соответствует второй скобке в (4) (изотерме), четыре предыдущих – первой (изобаре). Как и выше, для  $\mu_o$ , термодинамические величины, входящие в выражение (5) и являющиеся в общем случае парциальными мольными, превращаются в мольные при выборе в качестве стандартного состояния индивидуального вещества (но остаются парциальными, если стандарт – раствор).

### Структура и критерии качества информации

Отметим, во-первых, что, в силу определения (3) функций  $\tilde{G}_o$ ,  $\tilde{H}_o$  (которые далее обозначим, как и обычные функции образования,  $\Delta_f G^0$ ,  $\Delta_f H^0$ ) и тождества  $\Delta H = \Delta G + T\Delta S$  (справедливого для любого изотермического изменения состояния системы), при любых значениях  $P, T$  (в том числе и стандартных –  $P_o, T_o$ ) эти функции связаны соотношением

$$\Delta_f H^0 = \Delta_f G^0 + T\Delta_f S^0 \equiv \Delta_f G^0 + T \left( S^0 - \sum_{(i)} n_i S_i^0 \right), \quad (6)$$

где  $n_i, S_i^0$  – соответственно стехиометрические коэффициенты и стандартные энтропии простых веществ, определяемых элементным составом рассматриваемого соединения.

При наличии всех данных, необходимых для расчета температурно-барических зависимостей  $\Delta_f G^0(P, T)$  во всем поле устойчивого существования данного вещества, выражение (5) представляет собой полное термодинамическое описание этого вещества. Из него, как отмечено выше, могут быть (при каком-либо ином выборе независимых параметров состояния) получены другие, эквивалентные (5), описания, а также рассчитаны все необходимые термодинамические свойства веществ (типа  $H = \partial(G/T)/\partial(1/T)$ ,  $S^0 = -\partial G^0/\partial T$  и др.).

Таким образом, необходимым и достаточным условием полноты и корректности термодинамического описания физико-химической системы является «обеспеченность» расчетов (5), т.е. (с учетом принятых соглашений по стандартному состоянию) наличие для каждого из веществ, входящих в исследуемую систему, следующих четырех групп термодинамических характеристик:

- термических констант стандартного состояния:  $\Delta_f H_{298}^0$ ,  $\Delta_f G_{298}^0$ ,  $S_{298}^0$  (любые две из них, в силу (6), достаточны);
- термических констант фазовых переходов (если последние имеются):  $T_{tr}$ ,  $\Delta H_{tr}^0$  (или  $\Delta S_{tr}^0$ , так как  $\Delta H_{tr}^0 = T_{tr} \Delta S_{tr}^0$ );
- температурно-зависимых функций  $C_p^0(T)$  (при фиксированном, стандартном значении  $P = P_o = 1$  бар);
- барически-зависимых функций  $V^0(P, T)$  (в требуемой области температур).

Непосредственно отсюда вытекают следующие общие критерии (в целом рассмотренные выше), характеризующие в совокупности качество любой системы или базы термодинамических данных. Это, во-первых, степень ее химической полноты, показывающая, насколько широк круг включенных в нее веществ. Второе – это термодинамическая полнота, характеризующая наличие (или отсутствие) для веществ базы термодинамических данных по всем четырем указанным группам свойств, необходимых

для построения полного и строгого, в соответствии с (5), термодинамического описания. И, наконец, третья, ключевая ее характеристика – насколько достоверно это описание, т.е. какова объективная точность содержащейся в базе информации.

Ясно, что наиболее сложными и неоднозначными являются вопросы не полноты (как химической, так и термодинамической, причем требования к качеству здесь очевидны – «чем больше, тем лучше»), а достоверности информации, обеспечивающей расчет (5). Хотя, следует отметить, условия согласованности этих общих критериев (обусловленные взаимосвязями, по соответствующим реакциям, между значениями одного свойства для различных веществ – с одной стороны, и между различными термодинамическим свойствам одного вещества – с другой) дают возможность (при анализе термодинамической информации) получения наиболее корректных результирующих оценок.

Касаясь структуры описания (5), следует отметить, что учет влияния лишь последней, барической его составляющей  $\int_{T_0}^T V_o(p, T) dp$  не представляет (с определенными оговорками), независимо от класса рассматриваемых веществ, значительных трудностей. Во-первых, мольный объем многих индивидуальных веществ хорошо изучен при стандартных условиях. Кроме того, для конденсированных (твердых и жидких) фаз его величина  $V^o(P, T)$  незначительна, относительно слабо зависит от температуры и давления в достаточно широкой области значений параметров состояния, и вклад барической составляющей в величину  $\tilde{G}_o(P, T)$  потенциала (5), как правило (до давлений порядка 1000 атм), пренебрежимо мал. Для газов же, поведение которых в этой области близко к идеальному ( $P_i V^o = RT$ , где  $P_i$  – парциальное давление), расчет ее труда не представляет:

$$\int_{P_0}^{P_i} V^o(p, T) dp = RT \ln \frac{P_i}{P_0} = RT \ln \frac{RT}{P_0 V}$$

(или используя, если имеется, более точное уравнение состояния – типа уравнения Вандер-Ваальса, виримальное и др.).

Таким образом, для расчета (5) определяющими становятся данные первых трех групп термодинамических характеристик: константы – при стандартной температуре и при температурах фазовых переходов, и температурные зависимости  $C_p^o(T)$ . Причем все они взяты при фиксированном (стандартном) давлении  $P_0$ . Отметим также, что в практически важном частном случае условий, близких к стандартным (1 бар, 298.15 К), достаточно иметь лишь данные первой группы (стандартные термодинамические константы, связанные соотношением (6)).

## Реализация базы данных

Все изложенные выше особенности были учтены при реализации базы термодинамических свойств индивидуальных веществ, и при помощи соответствующей системы управления базами данных (СУБД) можно легко получить доступ к содержащейся в ней информации. Однако ценность этой базы определяется в контексте задач, использующих данную информацию.

Разработанный банк ASTIB согласованной термодинамической информации состоит из трех баз данных – для индивидуальных (в том числе нестехиометрических) конденсированных (свыше 2000 веществ), газообразных (около 2000) соединений и компонентов водных растворов (около 1500). Для каждого из конденсированных веществ приведены его химическая формула, стандартные энталпия  $\Delta_f H_{298}^o$  и энергия

Гиббса  $\Delta_f G_{298}^o$  образования, энтропия  $S_{298}^o$ , а также для каждого из фазовых (агрегатного либо структурного) состояний – соответствующий бинарный индекс, энталпия  $\Delta_{tr} H_T^o$  полиморфного или агрегатного (твердое – жидкость) превращения, температурный интервал существования этого состояния и коэффициенты уравнения  $C_p^o(T)$  температурной зависимости изобарной теплоемкости.

Для элементов «газовой базы» структура данных, естественно (за счет отсутствия фазовых переходов), упрощается.

В основе «водной базы» лежат стандартные значения констант и энталпий устойчивости комплексных соединений всех основных типов. Кроме того, в нее входят стандартные термические константы ключевых веществ – ядер и лигандов, образующих комплексы.

Свое применение разработанная база данных нашла в методе расчета равновесного состава многокомпонентных систем в широкой области параметров состояния. Этот метод, в силу своей универсальности, нашел широкое применение. Он позволяет исследовать любые процессы, в которых протекают химические и/или фазовые реакции: определять состав таких систем при различных условиях, а также зависимость состава от этих условий, что, в свою очередь, позволяет глубже понимать процесс и находить пути влияния на него.

Результаты практического применения метода состоят в следующем. Во-первых, изучен процесс коррозии в охлаждающих контурах АЭС. Во-вторых, изучены процессы синтеза ряда огнеупорных композиций, стекол, люминофоров.

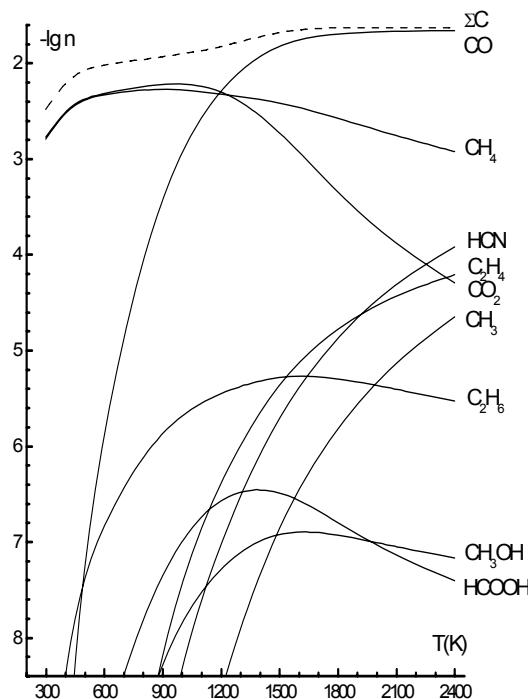


Рис.1 Влияние температуры на состав газообразных продуктов взаимодействия в периклазовом карбонированном материале: соединения на основе углерода

В частности, некоторые результаты расчетов фазово-химического состава много-компонентной неорганической системы, моделирующей поведение периклазуглеродистого огнеупора в условиях эксплуатации, представлены на рис. 1 и 2. Их анализ представляет значительный самостоятельный интерес и не входит в цели данной работы. Однако даже поверхностный взгляд на эти результаты демонстрирует перспективность

методов моделирования вообще и эффективность применения разработанного банка данных, в частности.

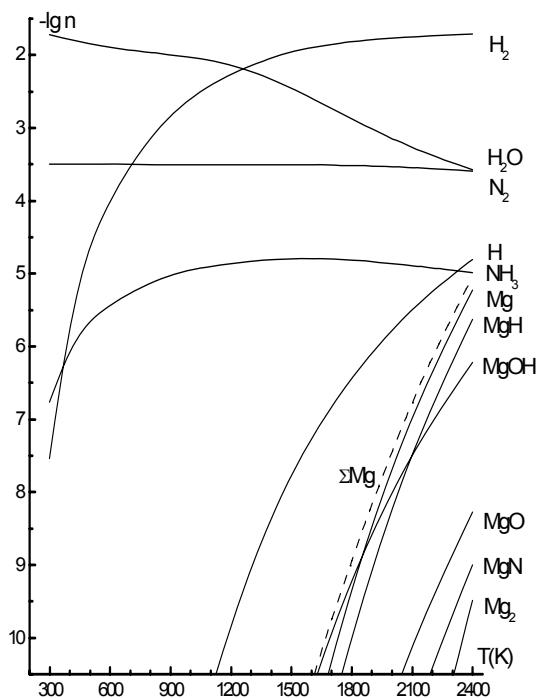


Рис. 2. Влияние температуры на состав газообразных продуктов взаимодействия в периклазовом карбонированном материале: соединения Mg, O, H, N.

### Заключение

Показана высокая (по сравнению с известными разработками) полнота, достоверность и согласованность информации баз банка ASTIB. Его программное сопровождение обеспечивает эффективный поиск и анализ требуемых термодинамических данных.

Разработанные методы и базы данных апробированы на многих тестовых и реальных природных и технологических (водных, люминофорных, термостойких, стеклообразующих и др.) системах. Показано, что по достоверности получаемых результатов комплекс ASTICS превосходит наиболее распространенные другие подобные разработки.

# ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ ГИРОСКОПЫ (ОБЗОР)

## С.Л. Горохов

В обзоре рассматриваются основные схемы волоконно-оптических гироскопов. Проводится классификация и анализ различных схем с точки зрения их применимости в различных областях.

### Введение

Волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), впервые реализованный в 1976 г., прошел более чем двадцатилетний этап развития в лабораторных условиях. Серийное производство и применение было начато только в последнее десятилетие. Основными преимуществами ВОГ являются их малый вес, низкое энергопотребление, высокая точность и быстрая готовность к работе, а также стойкость к большим перегрузкам и долгий срок службы.

На начальном этапе основным сдерживающим фактором являлось несовершенство компонентов ВОГ, главным образом волокна. По мере совершенствования волокна решающее значение стали приобретать параметры источников света (ИС), фотоприемников (ФП), делителей, а также способы обработки сигналов и методы производства ВОГ. К настоящему времени причины возникновения ошибок и паразитных сигналов в ВОГ достаточно полно изучены. Сейчас актуальная задача разработчиков – поиск методов компенсации сигналов, не связанных с вращением, что приведет к увеличению точности и стабильности показаний ВОГ. Параллельная задача состоит в миниатюризации и снижении стоимости конечного продукта. В множестве обзоров по данной тематике либо рассматриваются общие вопросы достижения наилучших параметров гироскопов, либо делается акцент на применении тех или иных компонентов и схемных решений при их построении. Цель данного обзора – обобщить и классифицировать различные схемы ВОГ и методы обработки сигналов в них.

### Классификация ВОГ

В первую очередь ВОГ делятся по классу точности (табл. 1).

Класс точности	Дрейф, гр/ч	Диапазон скоростей вращения, об/мин
1 инерционный	<0.01	<10
2 тактический	0.1-10	10-100
3 скоростной	10-100	Более 100

Таблица 1. Классы точности ВОГ

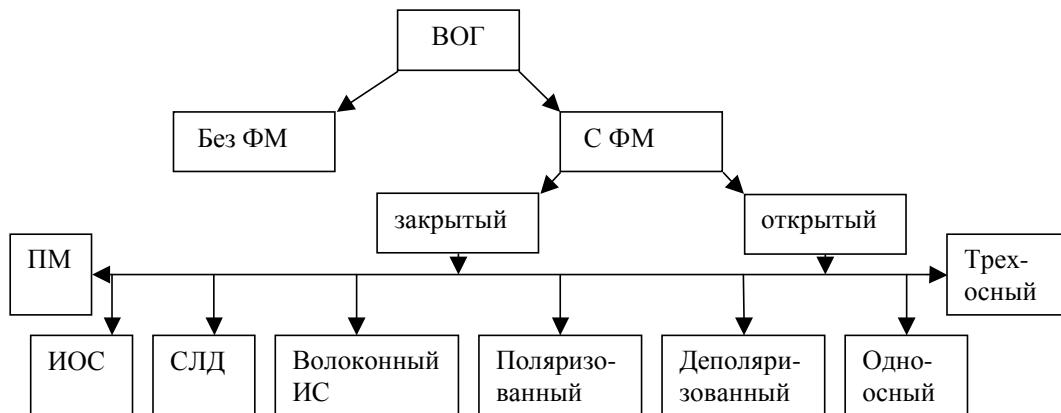


Рис. 1. Классификация ВОГ

Далее ВОГ можно классифицировать по наличию или отсутствию фазовой модуляции (ФМ), по режиму работы (закрытый, открытый циклы), по используемым компонентам (пьезомодулятор (ПМ) или интегрально-оптическая схема (ИОС); суперлюминесцентный (СЛД) или волоконный эрбьевый источник света (ВИС)), а также по степени поляризации распространяющихся в волокне световых волн (поляризованный, деполяризованный). Возможные варианты классификации ВОГ представлены на рис. 1.

### Открытые схемы ВОГ

Рассмотрение различных схем построения ВОГ удобно начать со схемы, показанной на рис. 2, в волоконном исполнении.

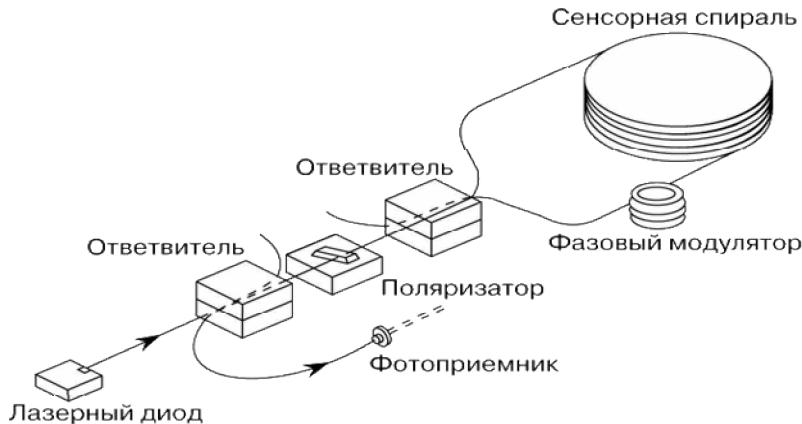


Рис. 2. Минимальная оптическая схема ВОГ

Здесь используется фазовый модулятор (ФМ), который необходим для максимизации чувствительности ВОГ при скоростях вращения, близких к нулю, и представляет из себя пьезокерамический цилиндр, на который наматывается часть волокна. Задача фазовой модуляции состоит в переносе рабочей точки на крутой, почти линейный участок характеристики. Для решения задачи необходимо внести невзаимный фазовый сдвиг между двумя волнами, распространяющимися по контуру в противоположных направлениях, на  $\pi/2$ . Модуляция осуществляется как прямоугольным (рис. 3) так и синусоидальным (рис.4, б, в) сигналом.

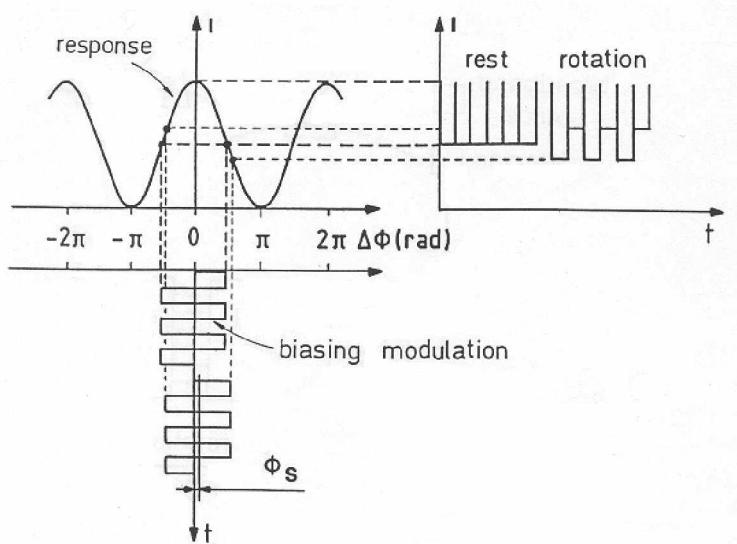


Рис. 3. Принцип модуляции прямоугольным сигналом

В пьезомодуляторе относительный сдвиг фаз встречных волн осуществляется путем растяжения волокна, намотанного на пьезокерамический цилиндр, при подаче напряжения на последний. В случае применения ИОС используется зависимость показателя преломления кристаллического волновода ( $\text{LiNbO}_3$ ) от приложенного напряжения. Так как модулятор одинаково воздействует на волны встречных направлений, то невзаимный сдвиг осуществляется за счет его несимметричного расположения. Таким образом, одна волна проходит модулятор сразу после разделения, а другая – через время  $T = Ln/c$ , где  $L$  – длина волокна в катушке,  $n$  – показатель преломления волновода,  $c$  – скорость света. Величина  $F = 1/2T$  является собственной частотой интерферометра. Модуляция по фазе  $(-\pi/2; \pi/2)$  происходит с частотой  $T/2$ . Частота модуляции должна быть равной  $F$  для уменьшения влияния асимметрии модулирующего сигнала.

Как известно, производители применяют и синусоидальную модуляцию. Относительная разница фаз встречных волн при этом составит величину  $T\Omega_m$ , где  $\Omega_m$  – круговая частота модуляции. Сигнал интерференции равен

$$I = I_0 \left[ 1 + \cos \left( \Phi_s + 2\Phi_m \sin \left\{ \frac{\Omega_m T}{2} \right\} \sin \left\{ \Omega_m t + \frac{\Omega_m T}{2} \right\} \right) \right], \quad (1)$$

где  $\Phi_m$  – амплитуда модуляции,  $t$  – время,  $I_0$  – интенсивность света источника,  $\Phi_s$  – фаза Саньяка.

Выражение (1) раскладывается по гармоникам частот модуляции с помощью функции Бесселя:

$$I = 2I_0 \left[ 1 + J_0 \left( 2\Phi_m \sin \frac{\Omega_m T}{2} \right) \right] \cos \Phi_s + 4I_1 \left( 2\Phi_m \sin \frac{\Omega_m T}{2} \right) \sin \Phi_s \cos \left[ \Omega_m \left( t - \frac{T}{2} \right) \right] + \dots, \quad (2)$$

где  $J_0, J_1$  – функции Бесселя соответствующего порядка. Для получения сигнала вращения используют первую гармонику, которая зависит от  $\sin \Phi_s$  и меняет знак при смене направления вращения. Амплитуда модуляции выбирается в соответствии с максимальным значением функции Бесселя, т.е.  $\Phi_m = 1.85$  рад.

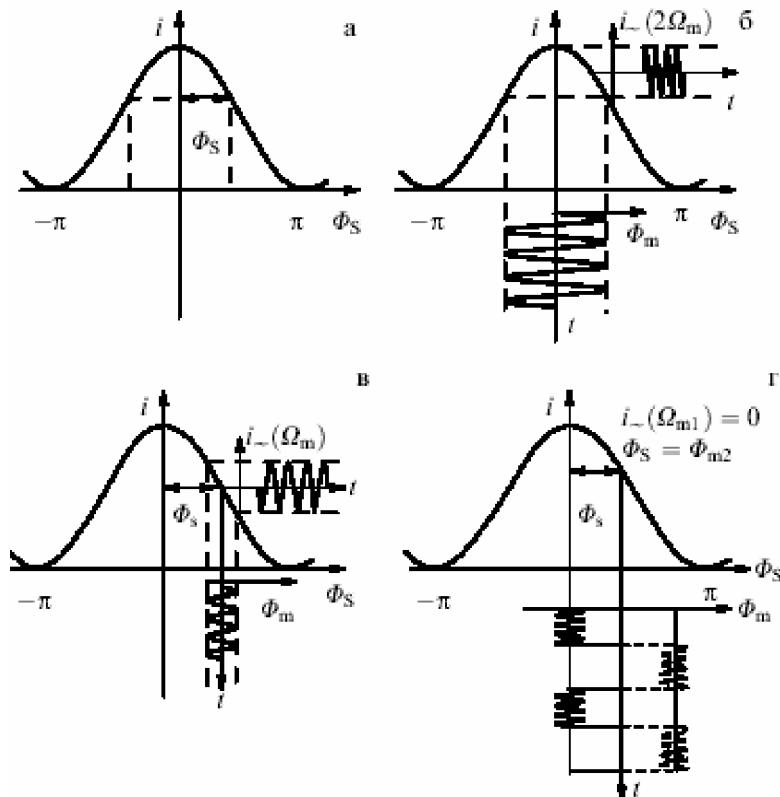


Рис. 4. Принцип синусоидальной модуляции

По описанной схеме НПФ «Физоптика» производит ВОГ, которые применяются для контроля движения и стабилизации автоматических систем. Эти гироскопы относятся ко второму и третьему классу точности, выполнены по безразрывной технологии и имеют такие преимущества, как миниатюрность, легкость (от 40 г) и низкое энергопотребление ( $>1$  Вт). Наиболее точный ВОГ этого семейства имеет точность 0.3–1 гр/ч. В данной конструкции используется волокно с сохранением поляризации. В настоящее время проводятся попытки достижения точности на уровне 0.1 гр/ч, что является пределом точности для открытых систем.

### Закрытая конфигурация

Выходной сигнал открытого ВОГ обладает большой нелинейностью, фоновыми шумами, зависит от чувствительности фотодетектора и изменения средней длины волны излучения. Поэтому для расширения динамического диапазона и увеличения точности прибора предпочтительнее использовать закрытые схемы ВОГ. Принцип работы такой схемы представлен на рис. 4г и рис. 5. Здесь наряду с высокочастотной синусоидальной модуляцией  $\Omega_{M1}$  производится и низкочастотная модуляция меандровым сигналом  $\Omega_{M2}$ , причем в приемном устройстве один полупериод сигнала меандра отсекается. Измерение значения вращения производится при обращении сигнала первой гармоники в ноль. Это происходит при  $\Phi_s = \Phi_{M2}$ . Закрытая схема обеспечивает линейный отклик с хорошей стабильностью, так как обратная связь не зависит от отраженной оптической мощности и усиления схемы детектирования.

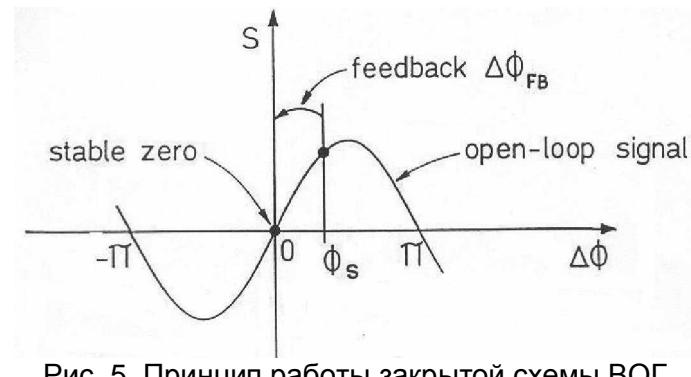


Рис. 5. Принцип работы закрытой схемы ВОГ

Цикл запускается сигналом пилообразной формы и постоянной амплитуды. Этот пилообразный сигнал осуществляет оптический сдвиг фазы между световыми волнами, чтобы восстановить сенсор в состояние, когда сдвиг фаз соответствует нулевой скорости вращения. Существуют три метода закрытия фазы. Это цифровой фазовый шаг (рис. 7), пилообразный сигнал фазы и двойной пилообразный сигнал (рис. 6).

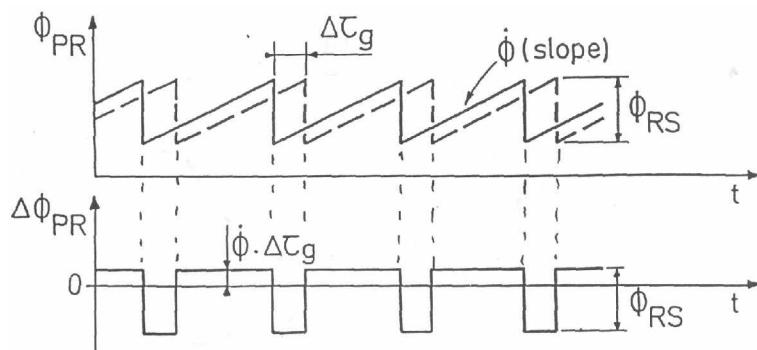


Рис. 6. Двойной пилообразный сигнал

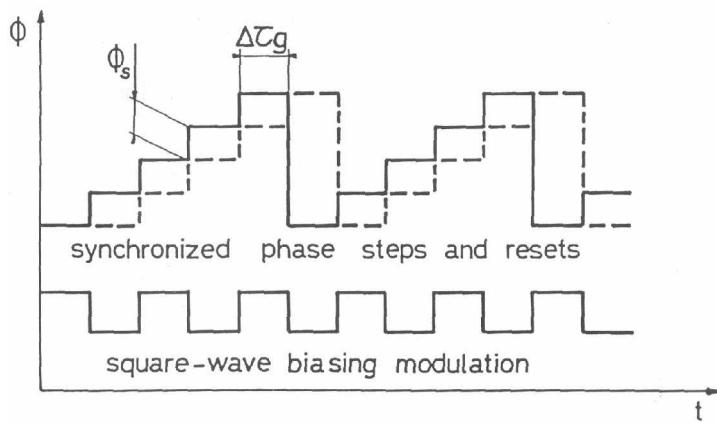


Рис. 7. Цифровой фазовый шаг

### Поляризованные и деполяризованные конструкции ВОГ

В настоящее время точные ВОГ, выпускаемые в промышленных масштабах, используют волокно с сохранением поляризации (ВСП). Но можно работать и с деполяризованным светом. Как показывает практика Honewell, ВОГ, работающий на деполяризованном свете, не уступает по своим характеристикам гироскопу на ВСП.

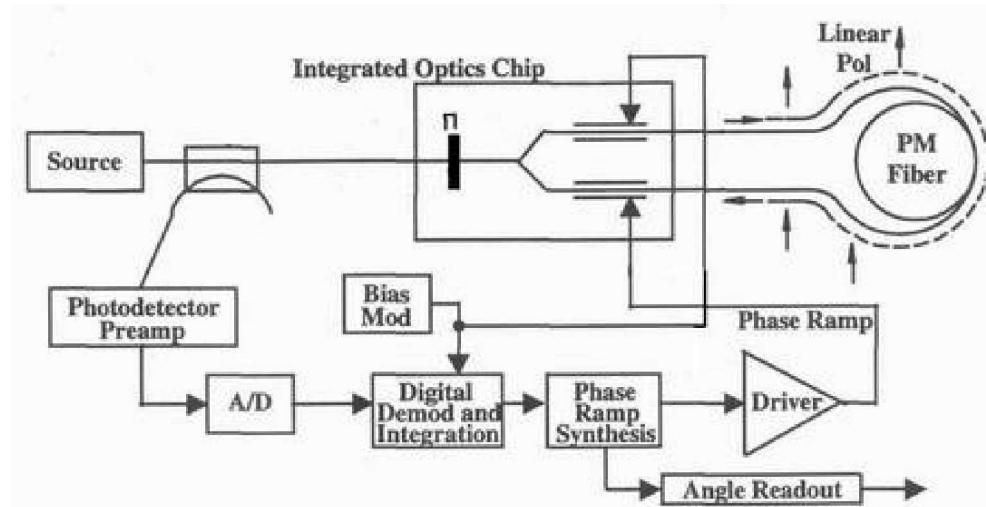


Рис. 8. Схема высокоточного ВОГ

Наибольшая ошибка в ВОГ с деполяризацией (ДВОГ) – невырожденная поляризация, которая уменьшает устойчивость смещения. Вторая по значению ошибка появляется из-за влияния магнитного поля. В волокне распространяются волны с различными поляризациями, что делает ДВОГ чувствительным к эффекту Фарадея. В ВОГ с сохранением поляризации (ПВОГ) свет, в основном, имеет линейную поляризацию, и эффект Фарадея проявляется вследствие остаточной эллиптичности вектора поляризации. Максимальная чувствительность ДВОГ к магнитному полю составляет величину 0.0005 град/ч/Гаусс. Показано, что для достижения лучших характеристик деполяризаторы необходимо устанавливать на обоих концах катушки, что уменьшает магнитную и температурную чувствительность. Применение только одного деполяризатора уменьшает устойчивость смещения до 100 раз.

Основной источник ошибок в ДВОГ – дефекты волокна, которые вызывают невзаимные двулучепреломления. Для подавления влияния невзаимного случайного двулучепреломления необходим деполяризатор достаточной длины, сращенный относительно оси линейной анизотропии точно под углом 45°. Максимальная точность сра-

щивания составляет  $0.5^\circ$ . При такой точности свет оказывается деполяризован на 96.6%. Устойчивость смещения ДВОГ при этом составила 0.005 град/ч. Случайный шум в ДВОГ в среднем на 17% выше, чем в аналогичном ПВОГ. Его можно уменьшить за счет увеличения глубины модуляции.

Флуктуации коэффициента масштабирования в значительной степени зависят от флуктуации поляризации в волокне. Значение сигнала интерференции зависит от относительной ориентации поляризаций. В худшем случае оба луча попадут на фотодетектор во взаимно ортогональных поляризациях и погасят друг друга (так называемый фединг сигнала). Для предотвращения этого явления на входе и выходе чувствительной катушки ставятся деполяризаторы. Они квазислучайно и равномерно раскладывают свет по всем возможным состояниям поляризации. Эффективность деполяризации увеличивается при использовании ИС с широким спектром.

### **ВОГ с суперлюминесцентными или волоконными эрбиевыми источниками света**

Разность хода лучей, обусловленная эффектом Саньяка, мала. Поэтому в ВОГ можно использовать источник с длиной когерентности, лишь немного большей разницы хода лучей. Это устранит влияние большей части отраженного и рассеянного света. Источник с низкой когерентностью ухудшает интерференцию из-за большой разницы длин оптического пути между светом обратного релеевского рассеяния и светом сигнала. Показано, что для регистрации вращения со скоростью  $0,1$  град/ч длина когерентности составляет величину порядка нескольких микрометров. Для примера: Не-Не лазер имеет длину когерентности  $L_c = 6\text{--}30$  см, у СЛД – примерно  $5\text{--}50$  мкм, у волоконных источников света (ВИС)  $L_c = 60\text{--}200$  мкм.

В приборах средней точности применяют обычно СЛД на длине волны 820 нм, что обосновывается их дешевизной, надежностью и повторяемостью характеристик. Недостатком СЛД можно считать высокую зависимость средней длины волны от температуры. Поэтому модуль с таким источником света содержит датчик температуры и элемент Пельтье. Мощность, вводимая в волокно таким СЛД, составляет  $0.5\text{--}3$  мВт.

По сравнению с СЛД ВИС имеют некоторые преимущества. ВИС может вводить в волокно мощность до 100 мВт и более (типично 5 мВт), имеет больший рабочий ресурс, длина волны излучения  $\lambda = 1.55$  мкм, что соответствует минимальным потерям в волокне, стабильность средней длины волны примерно в 50 раз лучше, чем у СЛД. Из недостатков стоит отметить большой избыточный шум интенсивности, который сильно влияет на пороговую чувствительность.

### **Трехосные гироскопы**

Для контроля параметров движения в трехмерном пространстве необходимо три гироскопа. Первоначально использовалась схема с одним ИС (СЛД), мощности которого хватало для параллельного подключения трех гироскопов. Затем перешли к схеме объединения с использованием одного общего приемника и ИС (рис. 9). В такой топологии необходимо разделение каналов, которое можно реализовать двумя способами.

Частотное разделение реализуется путем работы каждого ВОГ на своей частоте модуляции. Преимущества здесь состоят в возможности непрерывного получения данных со всех осей. Однако требуется хорошее подавление перекрестной помехи между непрерывной модуляцией и схемами детектирования.

Временное разделение позволяет использовать единую схему обработки сигнала для всех осей. Оно может реализоваться на оптических переключателях, которые направляют свет в нужный гироскоп, но предпочтительнее использовать электрическое переключение фазовой модуляции. При этом в каждый момент времени функциониру-

ет только тот гироскоп, на интегральную оптическую схему которого подается фазовая модуляция.

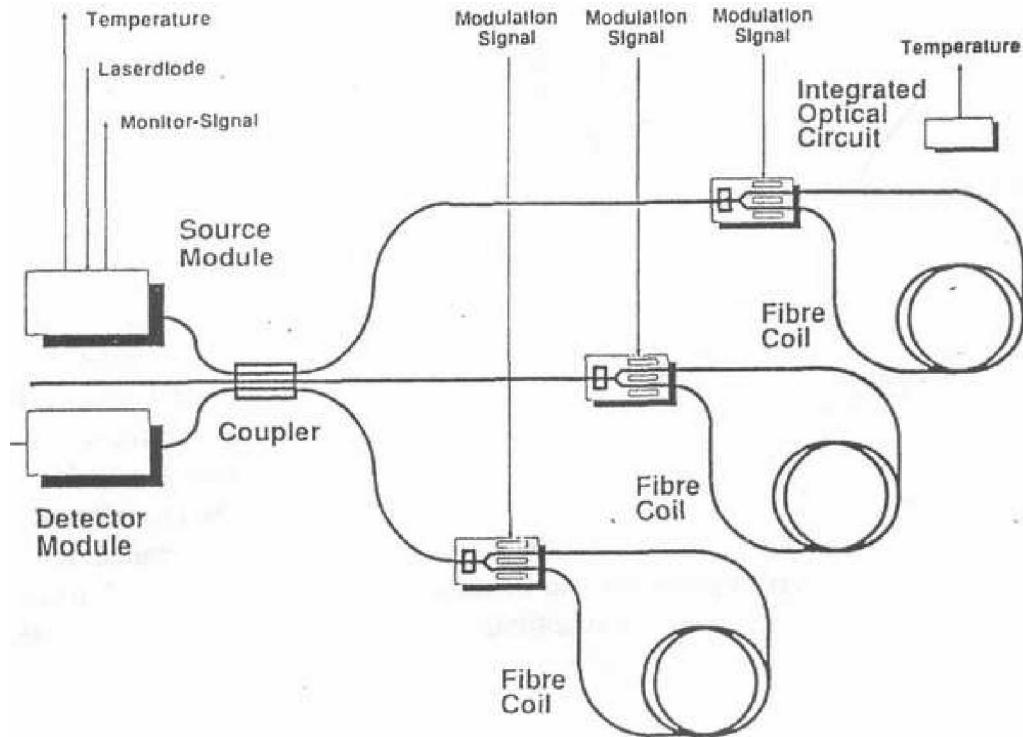


Рис. 9. Трехосный ВОГ с временным разделением модулирующего сигнала

### Заключение

Область применения ВОГ весьма обширна. Гироскопы второго и третьего класса точности находят применение в авионике, робототехнике, автомобилестроении. В таких ВОГ применяют СЛД на длине волны 0.85 мкм, анизотропное волокно длиной 200–500 м, пьезомодулятор и несложную схему управления. При этом достигаются малые габариты, вес и стоимость изделия.

ВОГ навигационного класса строятся исключительно по замкнутой схеме с применением ИС с длиной волны 1.55 мкм. Для более точных систем используют эрбьевые волоконные ИС. В настоящее время максимальные точности достигнуты в гироскопах, построенных по минимальной схеме с применением волокна с сохранением поляризации. Хороших результатов можно достигнуть и с одномодовым изотропным волокном. Но при этом необходимо выдерживать жесткие требования по точности изготовления и относительной юстировке всех оптических компонентов. Также требуются изощренные алгоритмы для выделения и фильтрации ошибочных сигналов. Для морской навигации требуется точность не хуже 0.01 град/ч. Для реализации такой точности за основу берется минимальная схема, где применяется ВИС, ИОС со встроенным поляризатором, одномодовое волокно типа PANDA, длиной около 1000 м, и фотоприемник с малым темновым током.

### Литература

1. Малыкин Г.Б., Андронова И.А. Физические проблемы волоконной гироскопии на эффекте Саньяка. // УФН. 2002. 172. № 8.
2. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н., Баранников ЮЛ., Гапонцев Губин В.П., В.П., Самарцев Н.Э., Старостин Н.И. Волоконно-оптический гироскоп с подавлением избыточного шума источника излучения. // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. №18.

3. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н. Компенсация паразитной поляризационной модуляции в волоконно-оптическом гироскопе. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. №15.
4. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н. Компенсация избыточного шума в волоконно-оптическом гироскопе с ответвителем типа 3\*3. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23, №15.
5. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н. Интерферометрия белого света с деполяризацией излучения. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. №14.
6. Малыкин Г.Б., Позднякова В.И., Шерешевский А.И. Предельная степень поляризации немонохроматического излучения, распространяющегося в волоконном световоде со случайными неоднородностями. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. №7.
7. Губин В.П., Коваленко В.Г., Сазонов А.И., Старостин Н.И. Пьезоволоконный фазовый модулятор света с пониженным уровнем поляризационной модуляции. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. №7.
8. Алексеев Э.И., Базаров Е.Н., Баранников Ю.А. Избыточный шум ER/YB волоконного суперфлуоресцентного источника излучения. // Письма в ЖТФ. 1997. Т. 23. №23.
9. Галкин С.Л. и др. Волоконная оптика и приборостроение. Л.: Машиностроение. 1987.
10. Шереметьев А.Г. Волоконно-оптический гироскоп. М. Радио и связь, 1987.
11. Loukianov D.P. Laser and fiber-optic gyros. The status and tendencies of development. 6-th St-Petersburg international conference on integrated navigation systems. St-Petersburg. May 1999.
12. Optical gyros and their application RTO-AG-339. May 1999.
13. D.A.Tazartes & J.G. Mark. A survey of optical gyroscopes. The 2-th St-Petersburg international conference of gyroscopic technology and navigation. St-Petersburg, May 1995.
14. Волоконно-оптические датчики угловой скорости компаний «оптолинк». [www.optolink.ru](http://www.optolink.ru).

## ПРИМЕНЕНИЕ ВОЛОКОННЫХ МИКРОЛИНЗ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ МЕЖСОЕДИНЕНИЙ

А.А. Петров, В.П. Вейко

В статье рассмотрен метод лазерного изготовления микролинз на оптических волокнах. Показано, что применение таких линз увеличивает эффективность ввода излучения полупроводникового лазерного диода в оптическое волокно.

### Введение

Проблема оптимизации оптических межсоединений при стыковке различных типов волоконных световодов (как одномодовых, так и многомодовых) между собой, с оптическими волноводами, а также с источниками излучения (полупроводниковыми лазерами и лазерными диодами) является одной из важнейших в световодных системах передачи и обработки информации. При решении задачи согласования должна быть обеспечена эффективная передача оптической мощности от одного элемента к другому. В оптоволоконных системах телекоммуникаций низкие потери соединения необходимы для достижения оптимальной производительности. Высокие потери соединения приводят к сокращению срока службы, уменьшению стабильности и надежности системы.

Для повышения эффективности связи волноводных структур, имеющих различные размеры и форму поперечного сечения (это относится и к оптическим волокнам, волноводам и источникам излучения), применяют, как правило, плавные волноводные переходы и оптические согласующие элементы [1]. В качестве внешних оптических согласующих элементов, помещаемых между торцами такого рода структур, могут использоваться различные типы линз и микролинз (сферические и полусферические, градиентные цилиндрические и т. п.), фоконы и их комбинации [2].

Одним из перспективных решений является изготовление согласующих оптических элементов непосредственно на торце оптического волокна с помощью лазерного нагрева. Для согласования полупроводниковых лазеров с оптическими волокнами применяют микролинзы, сформированные на коническом окончании волокна.

### Изготовление микролинз на коническом окончании волокон

В работе были использованы кварцевые оптические волокна двух типов с диаметром светонесущей жилы 62,5 мкм и 9 мкм, с внешним диаметром 125 мкм. Процесс изготовления микрооптических элементов на торцах волокон состоит из двух этапов – изготовление конического окончания и формирование микролинзы на вершине конуса.

Коническое окончание на оптическом волокне было изготовлено двумя способами. Первый – вытяжка волокна, нагреваемого газовой горелкой. Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

Оптическое волокно 1, предварительно защищенное от внешней оболочки и лакового покрытия, закреплялось в каретках 2, 3, одна из которых могла свободно перемещаться по направляющим. Очищенная область волокна нагревалась газовой горелкой 4 до температуры размягчения (более 1250° С). К каретке 3 приложена сила  $F$  (с помощью подвешенного груза). Применение газовой горелки дает большую длину зоны нагрева волокна (2–4 мм), при этом отсутствует контроль над температурой оптического

волокна. При использовании газовой горелки получается конус с малым углом сужения около  $0,025$  рад ( $1,5^\circ$ ) (см. рис. 2).

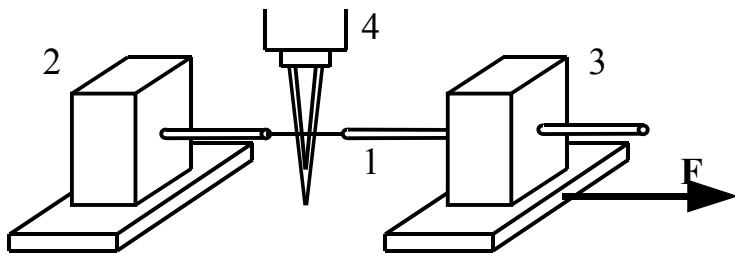


Рис. 1. Экспериментальная схема получения конического окончания волокна с помощью газовой горелки

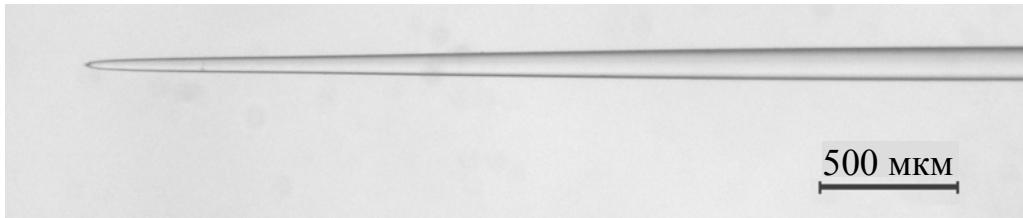


Рис. 2. Фотография конуса, полученного вытяжкой в газовом факеле (увеличение 32Х)

Основным достоинством этого способа является то, что вследствие равномерного нагрева значительной области получаемые оптические элементы обладают высокой осевой симметрией. К недостаткам получаемых элементов можно отнести малый угол конуса (значительную длину), что приводит к значительным потерям энергии излучения при распространении света по конусу.

Другой способ получения конусной поверхности на конце волокна – это использование лазерного излучения. Для этих целей используют  $\text{CO}_2$ -лазер и специальную оптическую схему, впервые предложенную для изготовления зондов для ближнепольной микроскопии [3]. Использование лазерного излучения имеет ряд преимуществ по сравнению с газовой горелкой. Во-первых, это локальность зоны воздействия, во-вторых, это возможность точного управления мощностью падающего излучения, а, следовательно, и температурой в зоне обработки. Получаемые с помощью лазера конические поверхности имеют значительно более короткий конус, чем при вытяжке с горелкой, углом которого можно управлять.

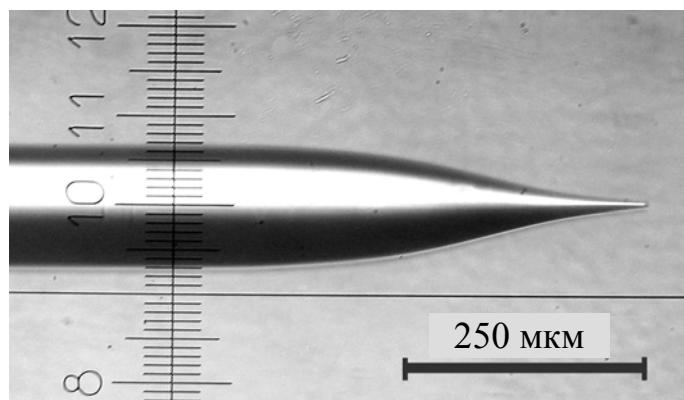


Рис. 3. Фотография конуса, полученного вытяжкой с помощью  $\text{CO}_2$ -лазера на установке с торOIDальным зеркалом

Следующий этап – изготовление микролинзы на вершине конического окончания. Для этих целей используется установка с CO<sub>2</sub>-лазером в качестве источника излучения, ее принципиальная схема представлена на рис. 4. Одним из важнейших технологических параметров, определяющих качество (симметрию) получаемых микролинз, является наличие биения при вращении оптического волокна вокруг собственной оси. Чтобы повысить точность позиционирования, была применена керамическая втулка (ferrule) со сквозным отверстием диаметром 126+1/-0 мкм, она играет роль подшипника скольжения. Применение втулки позволяет уменьшить биение до ~ 1 мкм.

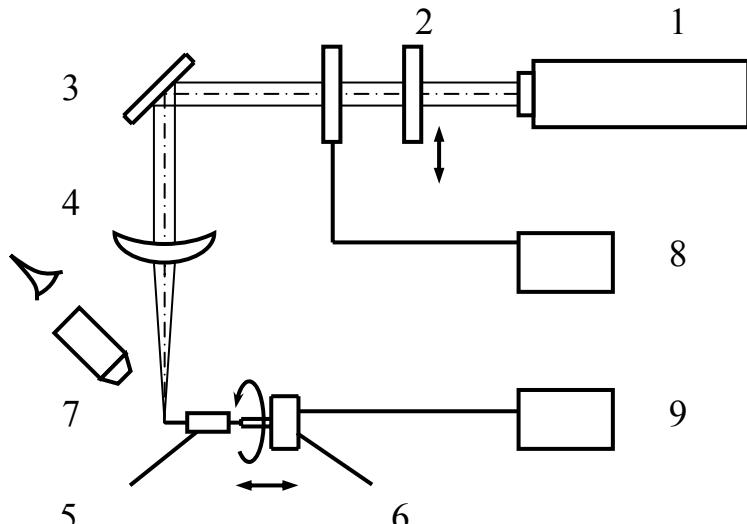


Рис. 4. Принципиальная схема экспериментальной установки (1 – CO<sub>2</sub>-лазер, 2 – затвор, 3 – зеркало, 4 – объектив, 5 – оптическое волокно в подшипнике, 6 – механизм вращения и продольной подачи, 7 – микроскоп, 8 – ослабитель, 9 – частотометр)

Волокно с конусом устанавливается в блок вращения (частота вращения 600 об/мин). С помощью микрометрических винтов совмещают ось волокна, закрепленного во втулке, с осью вращения. Волокно подается в зону обработки, производится окончательная юстировка с помощью зеркала при пониженной мощности излучения (менее 1 Вт). После этого мощность излучения повышается до заданного значения (1,5 Вт) и открывается основной затвор; время облучения составляет около 2 с. Процесс изготовления контролируется с помощью микроскопа.

Под действием лазерного излучения температура волокна повышается до температуры выше температуры размягчения (1250° С), после чего под действием сил поверхностного натяжения вершина конуса принимает полусферическую форму. На рис. 5 представлена фотография микролинзы, изготовленной на конусе, полученном в результате лазерной вытяжки, на рис. 6 конус получен вытяжкой в пламени газовой горелки.

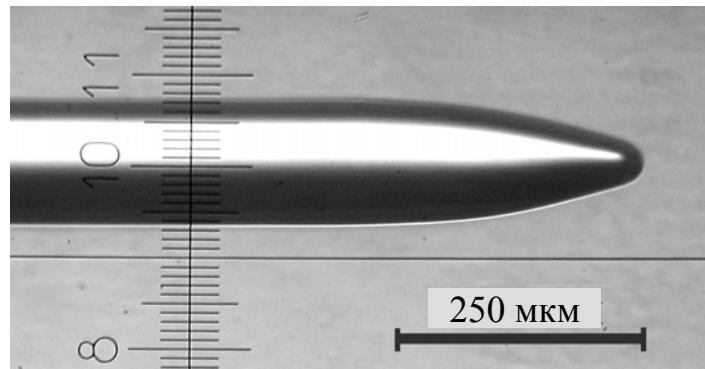


Рис. 5. Фотография микролинзы на коническом окончании (радиус 17 мкм)

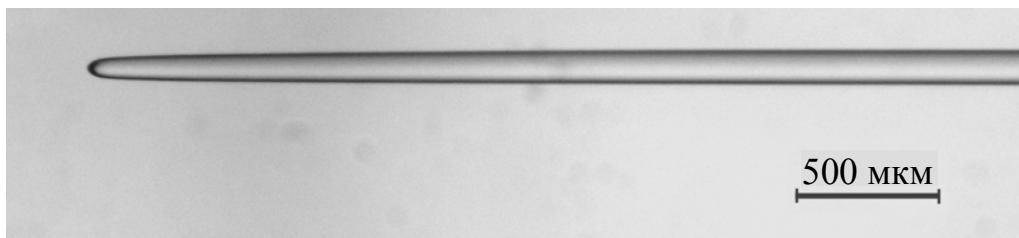


Рис. 6. Фотография микролинзы на коническом окончании (увеличение 32Х)

### Определение эффективности ввода излучения в оптическое волокно с использованием микролинз

Были проведены экспериментальные измерения эффективности оптического согласования полупроводникового лазера с волокном с микролинзой на торце волокна.

В качестве источника излучения был использован полупроводниковый лазерный диод LEDLASER HLDP-650-A-5-02, с длиной волны излучения 650 нм, мощность излучения до 5 мВт, излучающая площадка – прямоугольник с размерами  $1 \times 6$  мкм. Схема эксперимента представлена на рис. 7. Оптическое волокно выставлено по оси распространения лазерного пучка. В эксперименте измерена мощность излучения из выходного торца волокна при различной дистанции  $L$  между поверхностью лазерного диода и микролинзой. Фотография использованной микролинзы представлена на рис. 6. Линза была изготовлена на оптическом волокне с диаметром светонесущей жилы 62,5 мкм.

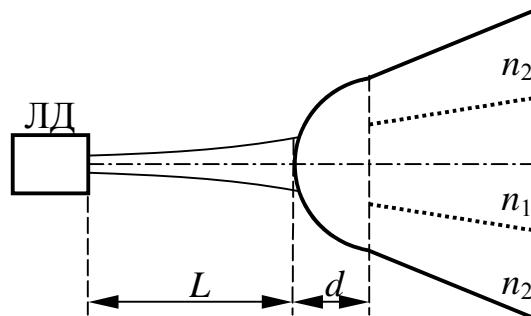


Рис. 7. Схема соединения лазерного диода с оптическим волокном через микролинзу на коническом окончании

Аналогичные измерения были проведены для волокна с плоским торцом. Результаты измерений представлены на графике (рис. 8).

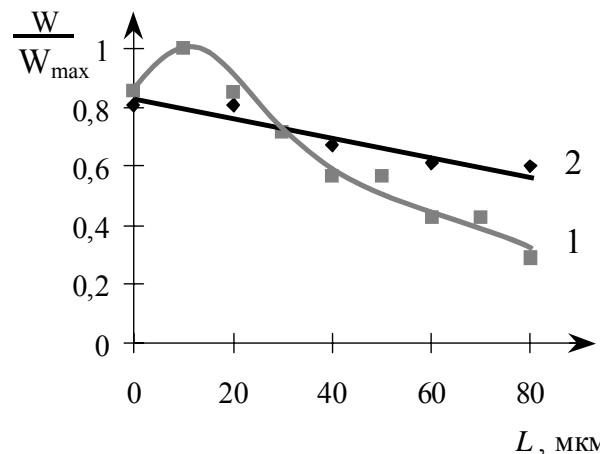


Рис. 8. Относительная мощность выходного излучения при соединении лазерного диода с волокном с линзой (1) и с плоским торцом (2)

По полученным результатам можно сделать вывод, что при использовании микролинз данного типа эффективность согласования лазерного диода с оптическим волокном может быть повышена на 25–35% (при оптимальном  $L$ ) по сравнению с использованием плоского торца истыковки в торец.

## **Заключение**

Микролинзы, формируемые на торце волокна с помощью лазерного излучения, могут быть использованы для согласования оптического волокна с полупроводниковыми источниками излучения. Они позволяют уменьшить потери при передаче излучения. Теоретические исследования показывают, что при использовании микролинз такого типа может быть достигнуто более чем двукратное повышение эффективности соединения [1].

Описанный метод изготовления микролинз обладает рядом преимуществ по сравнению с другими методами:

- повышается управляемость процесса формирования оптического элемента;
- отсутствует химическое загрязнение поверхности оптического элемента;
- получаемые элементы не требуют дополнительной обработки;
- можно работать с оптическим волокном различных размеров;
- полученные элементы обладают механической прочностью, аналогичной прочности исходного волокна.

Работа выполнена при поддержке гранта президента Российской Федерации на ведущую научную школу НШ-1370.2003.8.

## **Литература**

1. V.P. Veiko, N.B. Voznesensky, A.A. Petrov, V.F. Pashin, N.N. Voznesenskaya, S.M. Metev, C. Wochnowski Optical interconnection optimization based on a classical approach. // Proceedings SPIE, v.4977, Photon Processing in Microelectronics and Photonics II, p.569–577, 2003.
2. Семенов А.С., Смирнов В.Л., Шмалько А.В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Изд-во «Радио и связь», 1990.
3. K.A. Atlasov, V.P. Veiko, A.I. Kalachev “ Technology Optimization of the Laser – Assisted SNOM – Tips Stretching ”.Proceedings of SPIE, V. 5399, p.63-68, 2003.

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА С ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ЛАЗЕРНОЙ ВЫТЯЖКИ НАНОЗОНДОВ

В.П. Вейко, В.З. Зыонг, Е.Б. Яковлев

В работе проведены характеристики ближнепольных оптических зондов (БОЗ), полученных разными методами изготовления. Описана экспериментальная установка с обратной связью для лазерной вытяжки зондов. Приведены результаты экспериментов.

## Введение

Ближнепольная оптическая микроскопия (БОМ) является новым направлением в области сверхлокальных исследований. Основываясь на принципах ближнего поля, БОМ позволяет повысить разрешение до 30 нм, т.е. преодолеть дифракционный предел Аббе в оптических приборах. Кроме этого, БОМ дает возможность получать не только оптическое, но и топографическое изображение объекта, что увеличивает надежность полученной информации [1, 2].

Основным элементом БОМ является ближнепольный оптический зонд (БОЗ), который определяет разрешение БОМ. Зонд должен иметь размер выходной апертуры порядка нескольких десятков нанометров, эффективно подводить световую энергию к выходной апертуре зонда, обладать высокой лучевой стойкостью, а геометрическая форма острия должна позволять приближать его к любой точке поверхности образца на нужное расстояние.

БОЗ бывают разных видов. Одним из распространенных является БОЗ на основе оптического волокна. Технология изготовления БОЗ из оптического волокна состоит в том, что на одном из концов волокна изготавливают острие, диаметр вершины которого составляет нескольких десятков нанометров. Затем на вершине острия формируют диафрагму путем напыления на стенки острия тонкой металлической пленки толщиной около 10–30 нм; пленка обеспечивает также эффективную передачу излучения по зонду.

Между размером апертуры, который определяет разрешение микроскопа, и коэффициентом пропускания света имеет место компромисс.

Существует два метода изготовления БОЗ – химическое травление и механическая вытяжка.

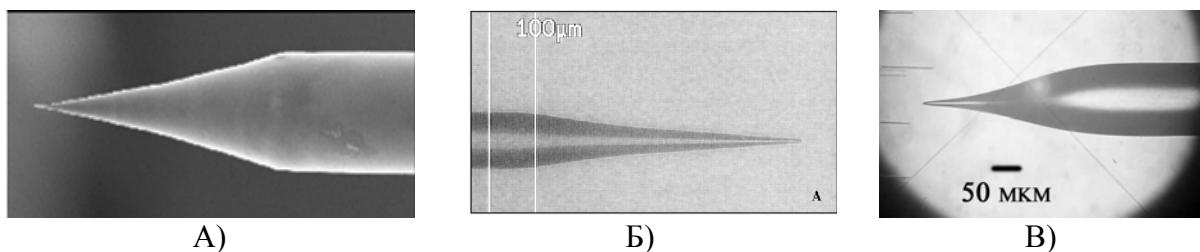


Рис 1. БОЗ из оптического волокна диаметром 125 мкм, изготовленные разными методами: А) – химическим травлением. Б) – механической вытяжкой с резистивным источником нагрева. В) – лазерной вытяжкой.

**БОЗ, изготовленные химическим травлением.** При химическом травлении зонд изготавливают следующим образом. Очищенный от защитного слоя конец оптического волокна погружают в раствор, состоящий из смеси HF, NH<sub>4</sub>F и H<sub>2</sub>O, которая является травителем для кварца, и жидкости с меньшей плотностью, например, толуола. Толуол располагается поверх травителя и служит для формирования мениска смачивания на границе толуол – травитель – волокно. По мере травления толщина волокна уменьшается, что приводит к уменьшению высоты мениска. В результате в процессе травления

на конце волокна происходит формирование конусообразного острия с характерными размерами меньше 100 нм [2].

При изготовлении зонда химическим травлением сердцевина волокна доходит до самого кончика зонда, поэтому зонд имеет большой коэффициент пропускания света. Но основной проблемой получения БОЗ методом химического травления является чувствительность формы острия к изменениям параметров окружающей среды в процессе травления, таким как вибрации, температурный дрейф и т.д. Изменение этих параметров проводят к значительным шероховатостям на поверхности зонда. Эта шероховатость и асимметрия вершины острия приводят к появлению отверстий в алюминиевом покрытии острия, что сказывается на качестве и размерах оптической апертуры.

**БОЗ, тянутые из волокна.** При этом методе БОЗ изготавливают из оптических волокон, которые вытягиваются при локальном нагревании участка волокна до вязкотекучего состояния маленького участка волокон. В качестве теплового источника для локального нагрева могут быть использованы газоразрядный или резистивный источники, а также лазерное излучение.

Лазерная технология вытяжки БОЗ в последнее время является перспективным методом изготовления БОЗ благодаря следующим преимуществам:

- локальность лазерного излучения;
- высокая степень поглощения излучения СО<sub>2</sub> лазера ( $\lambda = 10,6$  мкм) кварцем;
- быстрое включение и выключение теплового источника;
- химическая чистота, простота процесса.

Вытянутые зонды имеют высокое разрешение. Более того, поверхность вершины наконечника вытянутых зондов – оптически гладкая. Поэтому они предпочтительны для измерений в поляризованном свете.

Как показывают эксперименты, форма острия (его длина и конусность) сильно влияет на эффективность подвода излучения к выходной апертуре. Следовательно, определение предпочтительных геометрических параметров БОЗ очень важно при разработке технологии их изготовления. Это позволяет существенно улучшить их оптические и механические свойства.

Разумно предположить, что зонд необходимо сделать плавно сужающимся для уменьшения отражения и лучшей локализации световой волны, чтобы уменьшить потери на его стенках. Оптимальным углом конусности зонда считается угол  $\alpha \sim 20^\circ$ . Следовательно, эффективная длина острия, изготовленного из волокна диаметром 125 мкм, не должна превышать  $L=500$  мкм.

Зонды, изготовленные с использованием газоразрядного или резистивного источника, обычно имеют длинную сужающую часть и маленький угол конусности из-за большого размера зоны нагрева. Лазерный метод вытяжки зонда может устранить эти недостатки.

### **Экспериментальная установка для лазерной вытяжки зондов из оптических волокон**

При лазерной вытяжке зондов на параметры зонда влияют, главным образом, мощность излучения и сила растяжения. Экспериментальные результаты показали линейную зависимость удлинения полученных зондов от мощности лазерного излучения при одинаковой силе растяжения (рис 2). Однако при большой мощности форма зонда переходит от игольчатой к нитевидной, что уменьшает эффективность передачи светового сигнала. С целью повышения коэффициента пропускания света предлагается два способа контроля удлинения зондов:

- отключение лазерного излучения при определенном удлинении;

- увеличение скорости растяжения путем включения электромагнита при определенном удлинении.

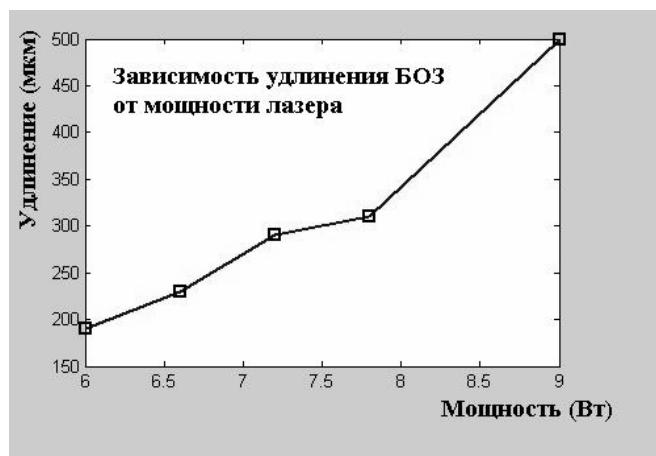


Рис. 2. Зависимость удлинения зонда от мощности лазерного излучения при постоянной растягивающей силе

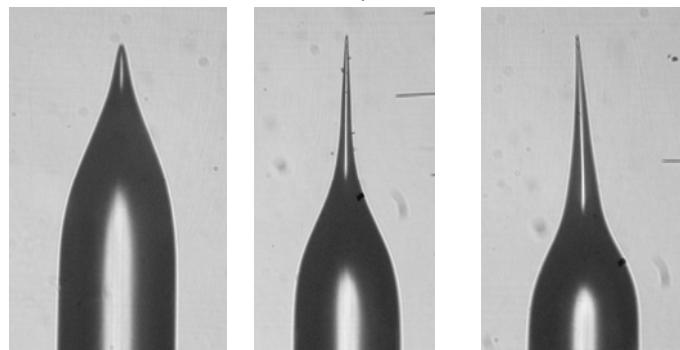


Рис. 3. Изменение формы зонда при увеличении мощности лазерного излучения

Схема экспериментальной установки с контролем удлинения представлена на рис. 4. Излучение CO<sub>2</sub> лазера попадает на конический элемент и преобразуется в кольцо. Затем излучение направляется на тороидальное зеркало, которое фокусирует его на образец (оптическое волокно) под прямым углом для получения двух идентичных зондов по обе стороны, что повышает производительность процесса вытяжки. Угол конического элемента соответствует расчетным параметрам тороидального зеркала, чтобы лазерное излучение фокусировалось на волокно под прямым углом [3].

Оптическое волокно (образец) крепится в суппортах, к которым прикладывается сила растяжения. При поглощении лазерного излучения участок волокна нагревается и переходит в вязкотекучее состояние. Под воздействием силы растяжения этот участок сужается с последующим обрывом. В результате получаются два симметричных острия. Процесс вытяжки длится нескольких десятых секунды.

В экспериментальной установке для контроля удлинения зондов использован электрический контакт (см. рис. 4). Контакт имеет клинообразный вид. Его устанавливают на некотором контролируемом расстоянии (обычно от 50 до 200 мкм) от суппорта. После того, как суппорты раздвигаются на это расстояние, контакт включает электромагнитный затвор, который перекрывает излучение. Процесс растяжения продолжается без лазерного излучения.

На рис. 5 показаны зонды, полученные при различных значениях контролируемого удлинения. Экспериментальные результаты показывают, что при значении контролируемого удлинения от 50 до 100 мкм полученные зонды плавно сужаются и имеют более короткие конусы.

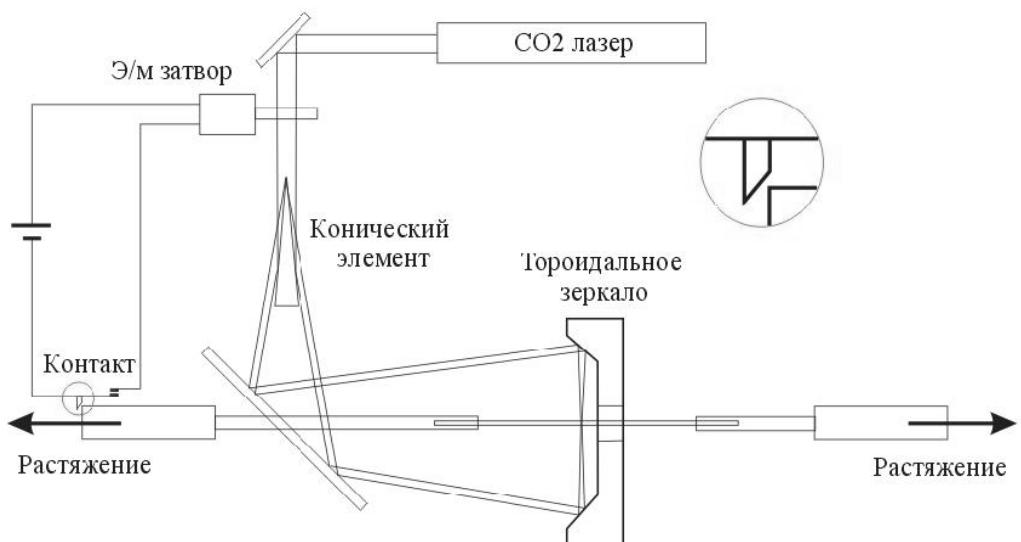


Рис. 4. Схема экспериментальной установки лазерной вытяжки зондов с контролем удлинения с помощью электромагнитного затвора

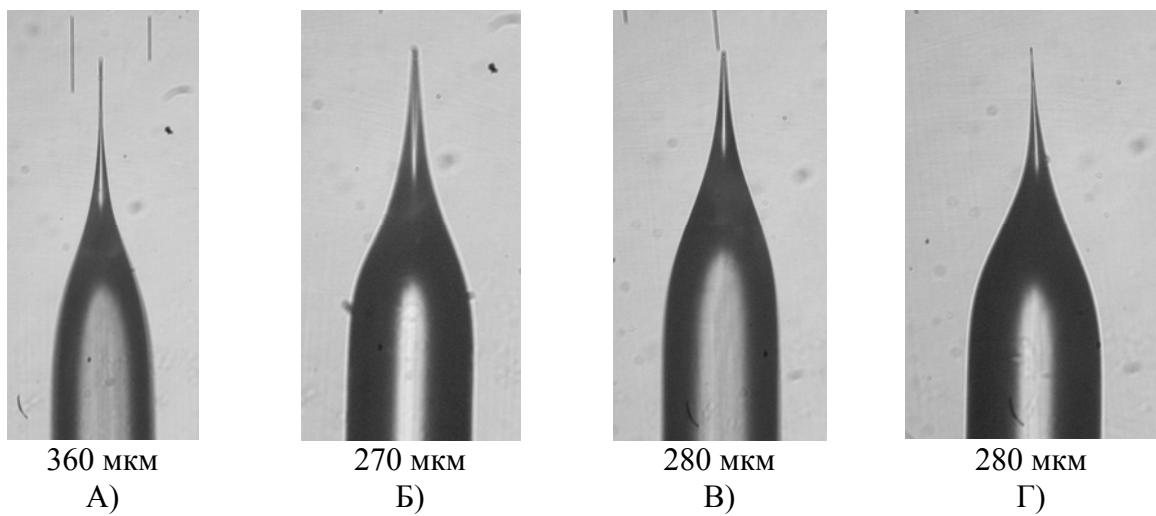


Рис. 5. Зонды, полученные при разных значениях контролируемого удлинения: А) – нет контроля, Б) – 50 мкм, Д) – 100 мкм, Г) – 150 мкм. Сила растяжения 5 Н, мощность лазерного излучения 8 Вт

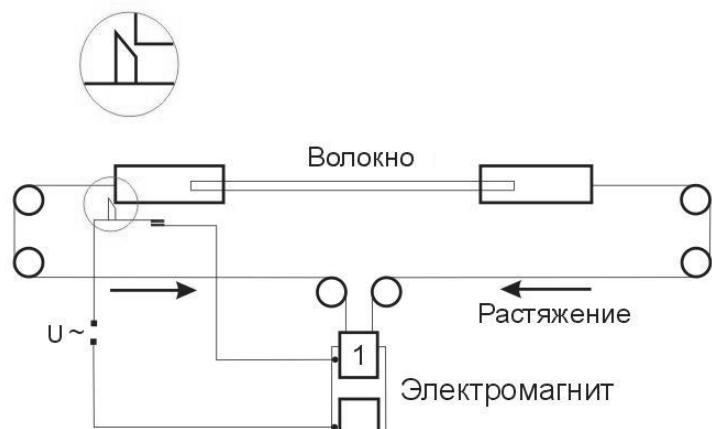


Рис. 6. Схема экспериментальной установки лазерной вытяжки зондов с контролем удлинения с помощью электромагнита



Рис. 7. Зонды, полученные на установке с электромагнитом. А) – без контроля удлинения. Б) – с контролем удлинения на 100 мкм. Мощность лазерного излучения 8 Вт

Другой способ контроля удлинения зонда схематически показан на рис. 6. При этом способе вытяжка сначала идет под действием силы тяжести сердечника электромагнита (элемент 1 на рис. 6). Аналогично предыдущей схеме, клиновидный контакт установлен на контролируемом расстоянии. После того, как суппорты раздвигаются на это расстояние, контакт включает электромагнит, который сразу разрывает волокно. Полученные на этой установке зонды показаны на рис. 7. При контроле удлинения зонд плавно сужается и имеет более короткую сужающуюся часть.

### Заключение

В работе рассмотрены характеристики зондов, полученных различными методами. Сформулированы основные требования к зондам. Описана экспериментальная установка для лазерной вытяжки зондов контролем по удлинению. Показано влияние режимов на параметры зондов.

### Литература

1. Либенсон М.Н. Преодоление дифракционного предела в физике. // Сороссовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. №3. С. 99–104.
2. Миронов В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: РАН Институт физики микроструктур, 2004.
3. K.A. Atlasov, V.P. Veiko, A.I. Kalachev. Technology Optimization of the Laser – Assisted SNOM – Tips Stretching. //Proceedings of SPIE. 2003. V. 5399. P.63–68.

# О КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИМПУЛЬСНЫХ СИГНАЛОВ АВИАЦИОННОГО ОКЕАНОГРАФИЧЕСКОГО ЛИДАРА

## Ю.И. Копилевич, А.Г. Сурков

Предложена теоретическая модель, количественно описывающая преобразование входных оптических импульсов авиационной лидарной системы, применяемой для дистанционного лазерного зондирования толщи морской воды, в регистрируемые выходные сигналы приемно-усилительного тракта системы. Рассмотрены практические применения модели.

### Введение

Лазерные импульсные системы применяются для дистанционного зондирования приповерхностного слоя океана с конца 1960-х годов [1]. Сегодня лидары, установленные на авианосителях, служат надежными и высокоэффективными инструментами для батиметрии прибрежного шельфа [2]. В то же время теоретически доказанная принципиальная возможность определения первичных гидрооптических параметров [3] морской воды с помощью лидара [4] до настоящего времени практически не реализована.

Для практической реализации метода восстановления оптических параметров морской среды по данным лидарного зондирования необходимо решение двух задач. Первая из них – разработка адекватной теоретической модели для вычисления лидарного отклика зондируемой среды по ее гидрооптическим характеристикам – рассматривалась в предыдущих публикациях [5, 6]. Настоящая работа посвящена второй важнейшей задаче – установлению количественной связи сигналов на выходе приемно-усилительного тракта лидарной системы с времененным распределением мощности оптического сигнала на входе лидарного приемника. Нетривиальность этой задачи связана с импульсным характером принимаемых оптических сигналов (длительность зондирующего лазерного импульса в современных лидарах составляет несколько наносекунд) в сочетании с конечной полосой пропускания приемно-усилительного тракта, а также с заведомой нелинейностью канала регистрации, обусловленной необходимостью сжатия динамического диапазона входного сигнала (изменение мощности импульсного лидарного отклика, начинающегося с отражения лазерного пучка от поверхности воды и заканчивающегося обратным рассеянием от глубинных слоев, может достигать четырех–пяти порядков).

В работе предложена математическая модель приемно-усилительного тракта лидарной системы и описана методика определения функциональных характеристик модели по данным радиометрических калибровочных измерений. Разработаны алгоритмы количественного восстановления параметров сигнала обратного рассеяния от толщи воды и импульса отражения от дна по данным лидарного зондирования.

### Математическая модель приемного тракта

Приемно-усилительный тракт лидарной системы состоит из детектора (обычно это фотоэлектрический умножитель), усилителя и аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Преобразование оптического сигнала  $I(t)$  на входе тракта (временного распределения мощности света, попадающего на детектор) в выходной электрический сигнал  $S(t)$  (временное распределение напряжения, регистрируемое как последовательность отсчетов АЦП) зададим формулами:

$$S(t) = \chi[J(t)] \quad J(t) = \int_0^{\infty} I(t-t') \cdot \Phi(t') dt' , \quad (1)$$

где  $\Phi(t)$  – нормированная аппаратная функция тракта, описывающая эффект конечного времени отклика или ограниченной полосы пропускания канала. Здесь и всюду далее обозначение  $\hat{f}(t)$  используется для нормированных функций, т.е. для любой функции  $f(t)$ ,  $0 \leq t < \infty$ . Имеем

$$\hat{f}(t) \equiv \frac{f(t)}{\|f\|}; \quad \|f\| \equiv \int_0^\infty |f(t)| dt. \quad (2)$$

Монотонная функция  $\chi[\cdot]$ , аргумент которой измеряется в единицах мощности, а значения – в отсчетах АЦП, может быть названа характеристикой приемно-усилительного тракта. Физический смысл введенной характеристики ясен из рассмотрения случая постоянного во времени оптического сигнала  $I(t) = I = \text{const}(t)$ ; при этом из (1) следует, ввиду (2), равенство

$$S(t) \equiv S = \chi[I]. \quad (3)$$

Промежуточный сигнал

$$J(t) = \int_0^\infty I(t-t') \cdot \Phi(t') dt' \quad (4)$$

можно рассматривать как «виртуальный» оптический сигнал, который соответствовал бы заданному выходному сигналу  $S(t)$  при неограниченной полосе пропускания канала.

Заметим, что в общем случае аппаратная функция  $\Phi(t)$  в (1) может зависеть от уровня мощности входного сигнала, так что преобразование (4) не является вполне линейным. Предположение о независимости этой функции от уровня оптического сигнала может быть обосновано результатами калибровочных измерений.

### Интерпретация калибровочных измерений

При радиометрической калибровке лидарной системы обычно используют импульсное излучение собственного лазера лидара, отраженное от достаточно удаленного плоского экрана. Сменные ослабляющие светофильтры, установленные на выходе излучателя, позволяют изменять мощность импульсов, поступающих на вход приемника, причем пиковая мощность приходящих импульсов измеряется независимым прибором. Таким образом, при калибровочных измерениях входные оптические сигналы имеют вид

$$I_W(t) = W \cdot l_1(t), \quad (5)$$

где  $l_1(t)$  – известная форма излучаемого лазерного импульса с единичной пиковой мощностью (безразмерная функция), а  $W$  – измеренная пиковая мощность импульса на входе приемно-усилительного тракта. Для промежуточного оптического сигнала  $J_W$ , соответствующего входному сигналу  $I_W(t)$  из (5), в силу (4) получаем

$$J_W(t) = \int_0^\infty I_W(t-t') \cdot \Phi(t') dt' = W \cdot \int_0^\infty l_1(t-t') \cdot \Phi(t') dt' = W \cdot \|l_1\| \cdot \int_0^\infty \hat{l}_1(t-t') \cdot \Phi(t') dt'. \quad (6)$$

Функцию

$$\hat{R}(t) \equiv \int_0^\infty \hat{l}_1(t-t') \cdot \Phi(t') dt' \equiv \hat{l}_1(t) * \Phi(t) \quad (7)$$

будем называть «нормированным откликом канала» на исходный лазерный импульс. Связь этой функции с выходным сигналом  $S_W(t)$ , зарегистрированным при калибровочных измерениях, легко получить из (1), (6), и (7):

$$S_W(t) = \chi[W \cdot \|l_1\| \cdot \hat{R}(t)]. \quad (8)$$

В результате калибровки получают так называемую «калибровочную кривую» тракта  $C(W)$ , которая соотносит максимум каждого зарегистрированного сигнала  $S_W(t)$  с пиковой мощностью  $W$  соответствующего входного сигнала  $I_W(t)$ :

$$C(W) \equiv \max\{S_W(t)\} = \chi[W \cdot \|l_1\| \cdot \max\{\mathcal{R}(t)\}], \quad (9)$$

причем последнее равенство использует монотонный характер характеристики  $\chi[\cdot]$ . Из уравнения (9) легко получить связь между обратными к  $C(\cdot)$  и  $\chi[\cdot]$  преобразованиями максимумов выходных сигналов в пиковые мощности принимаемых оптических импульсов:

$$\begin{aligned} C^{-1}(\max\{S_W(t)\}) &= W; \\ \chi^{-1}(\max\{S_W(t)\}) &= W \cdot \|l_1\| \cdot \max\{\mathcal{R}(t)\} = \|l_1\| \cdot \max\{\mathcal{R}(t)\} \cdot C^{-1}(\max\{S_W(t)\}) . \end{aligned} \quad (10)$$

При условии, что коэффициент  $\max\{\mathcal{R}(t)\}$  можно считать независимым от мощности входного импульса, соотношение (10) применимо ко всему выходному сигналу  $S_W(t)$ , так что [см. (8)]

$$\chi^{-1}(S_W(t)) = W \cdot \|l_1\| \cdot \mathcal{R}(t) = \|l_1\| \cdot \max\{\mathcal{R}(t)\} \cdot C^{-1}(S_W(t)) . \quad (11)$$

Уравнение (11) дает алгоритм вычисления нормированного отклика (7) по данным калибровочных измерений:

$$\mathcal{R}(t) = \frac{C^{-1}(S_W(t))}{\|C^{-1}(S_W(t))\|} . \quad (12)$$

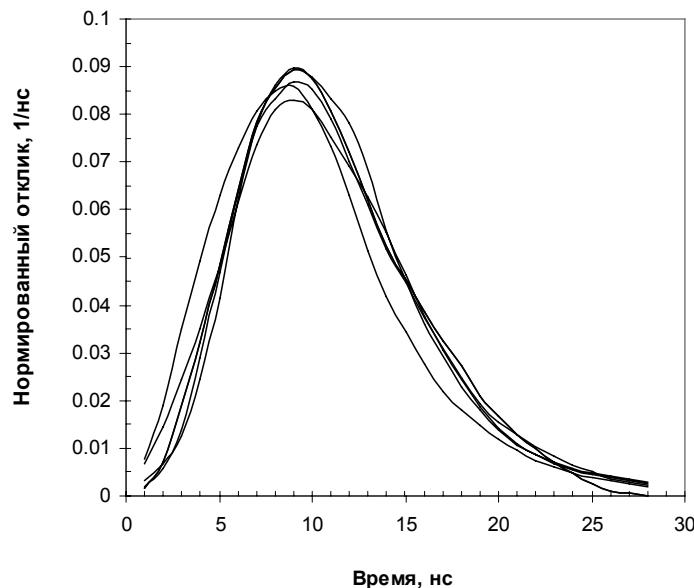


Рис.1. Нормированные отклики приемно-усилительного тракта лидара SHOALS на лазерные импульсы с пиковой мощностью в диапазоне  $1 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-3}$  Вт.

В качестве примера рассмотрим применение развитого подхода к данным калибровки лидара SHOALS (Scanning Hydrographic Operational Airborne Lidar Survey) фирмы Optech Incorporated (Канада) [7]; следует отметить, что эта фирма является единственным производителем серийных батиметрических лидаров. Рис. 1 демонстрирует результаты обработки калибровочных измерений для одного из каналов SHOALS – глубоководного канала, использующего ФЭУ в качестве детектора. Каждая из кривых приведенного на рисунке семейства получена по формуле (12) для конкретного значения  $W$  пиковой мощности принимаемого импульса в диапазоне  $1 \cdot 10^{-7}$ – $1 \cdot 10^{-3}$  Вт. Наблюдаемые различия кривых вполне объясняются неточностью калибровочных изме-

рений, так что нормированный отклик  $\hat{R}(t)$  может считаться независимым от пиковой мощности принимаемого лазерного импульса. В силу (7) это подтверждает также предположение о независимости аппаратной функции приемно-усилительного тракта  $\hat{\Theta}(t)$  из (1) от уровня мощности входного сигнала.

Вычисление функции  $\hat{R}(t)$  по данным калибровочных измерений из уравнения (12) позволяет получить характеристику приемно-усилительного тракта  $\chi[\cdot]$ , исходя из соотношения (9). Для не зависящего от уровня сигнала коэффициента  $\max\{\hat{R}(t)\}$  и известной формы лазерного импульса искомая характеристика получается из калибровочной кривой  $C(W)$  простым делением ее аргумента на величину  $\|l_1\| \cdot \max\{\hat{R}(t)\}$  [см. (9)]:

$$\chi[W] = C\left(\frac{W}{\|l_1\| \cdot \max\{\hat{R}(t)\}}\right). \quad (13)$$

В частности, в случае рассматриваемого канала лидара SHOALS  $\|l_1\| \cdot \max\{\hat{R}(t)\} \approx \approx 5,5 \text{ нс} \cdot 0,088 \text{ нс}^{-1} = 0,48$ , причем использованы среднее значение максимумов откликов, изображенных на рис. 1, и заданная длительность лазерного импульса на половине пиковой мощности  $T = 5,5 \text{ нс}$ , совпадающая с величиной  $\|l_1\|$  для рекомендуемой изготавителем лазера модели импульса:

$$l_1(t) = \cos^2\left(\frac{\pi}{2}\left(\frac{t}{T} - 1\right)\right), \quad 0 \leq t \leq 2 \cdot T.$$

Полученная характеристика приемно-усилительного тракта  $\chi[W]$  представлена на рис. 2 вместе с калибровочной кривой  $C(W)$ .

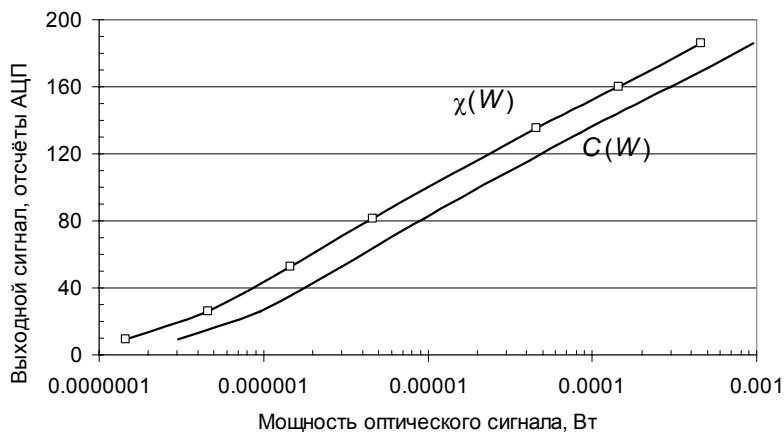


Рис. 2. Характеристика  $\chi[W]$  и калибровочная кривая  $C(W)$  для приемно-усилительного тракта лидара SHOALS

### Приложение к задаче определения оптических параметров морской воды

Методы оценки гидрооптических параметров морской воды по данным дистанционного лазерного зондирования (см., напр., [4]) основаны на приближении зарегистрированного лидарного сигнала (во временном интервале, где сигнал создается обратным рассеянием зондирующего импульса толщиной воды) теоретически рассчитанным модельным сигналом. При этом используемые в расчете значения гидрооптических параметров среды, обеспечивающие наилучшее приближение, принимаются за оценку соответствующих характеристик зондируемого слоя океана.

Теоретическая модель лидарного сигнала позволяет расчитать временное распределение мощности излучения, поступающего на детектор приемно-усилительного тракта лидара, в то время как экспериментальным результатом является зарегистрированная последовательность отсчетов АЦП на выходе этого тракта. Таким образом, возникает задача пересчета модельных данных в соответствующие выходные сигналы лидара, которая может быть решена с помощью описанного выше подхода.

Лидарное уравнение (модель лидарного отклика) определяет форму оптического сигнала на входе детектора  $I_\delta(t)$ ,  $t \geq 0$ , для  $\delta$ -образного зондирующего импульса с энергией, равной энергии реального лазерного импульса. Входной сигнал, учитывающий конечную длительность лазерного импульса  $\hat{E}_l(t)$ , моделируется выражением

$$I(t) = I_\delta(t) * \hat{E}_l(t) \equiv \int_0^\infty I_\delta(t-t') \cdot \hat{E}_l(t') dt' . \quad (14)$$

Соответствующий промежуточный сигнал, в силу (4), есть

$$J(t) = \int_0^\infty I(t-t') \cdot \hat{\Omega}(t') dt' = I_\delta(t) * \hat{E}_l(t) * \hat{\Omega}(t) = I_\delta(t) * \hat{R}(t) . \quad (15)$$

Наконец, теоретический выходной сигнал, который может быть сравнен с экспериментально зарегистрированным результатом, получается из формулы, следующей из (1):

$$\chi[J(t)] = \chi[I_\delta(t) * \hat{R}(t)] . \quad (16)$$

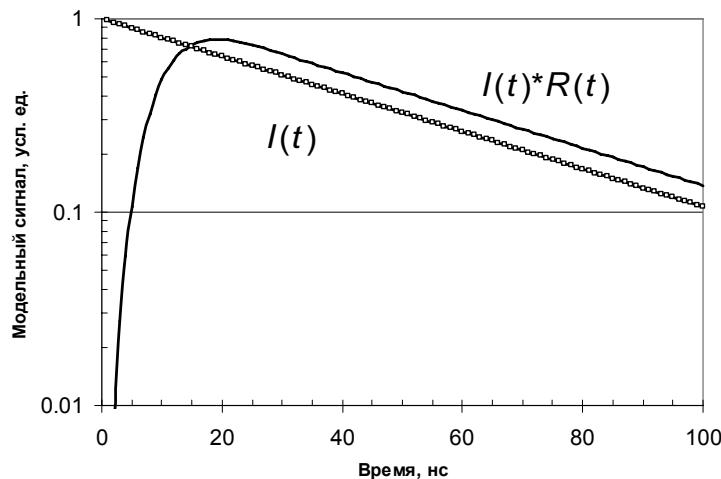


Рис. 3. Модель (17) лидарного сигнала  $I_\delta(t)$  для  $\delta$ -образного импульса и его свертка  $I_\delta(t) * \hat{R}(t)$  с нормированным откликом приемно-усилительного тракта;  $K = 0,1 \text{ м}^{-1}$ .

Эффект отклика  $\hat{R}(t)$  приемно-усилительного тракта и возможные ошибки восстановления оптических характеристик среды при пренебрежении этим эффектом можно продемонстрировать на примере простейшей модели лидарного сигнала

$$I_\delta(t) \sim \exp\left(-K \frac{v \cdot t}{n}\right) , \quad (17)$$

где  $K$  – показатель ослабления лазерного пучка,  $v$  и  $n$  – скорость света в вакууме и показатель преломления морской воды, соответственно. На рис. 3 прямая линия (в логарифмическом масштабе) соответствует модели (17) при  $K = 0,1 \text{ м}^{-1}$ ; кривая линия изображает зависимость (15), т.е. свертку этой модели с нормированным откликом (см. рис. 2). Видно, что в области достаточно больших глубин, когда влияние поверхности перестает сказываться ( $t > 20 \text{ нс}$ ), различие этих функций практически не затрагивает показателя экспоненциального убывания, и, следовательно, пренебрежение эффектом конечности отклика не приведет к заметным ошибкам определения параметра  $K$ . С другой стороны, ошибка определения предэкспоненциального множителя в лидарной мо-

дели (на практике это показатель рассеяния в направлении «назад» [3]) в рассматриваемом случае составляет 30% и возрастает с ростом  $K$ ; для  $K = 0,2 \text{ м}^{-1}$  эта ошибка достигает уже 80%.

Из рис. 2 ясно, что дополнительная ошибка в оценке показателя рассеяния в направлении «назад» очевидно возникает при использовании в уравнении (16) калибровочной кривой  $C(W)$  вместо характеристики  $\chi[W]$ ; для приемника SHOALS эта ошибка превышает 100%.

### Приложение к задаче определения коэффициента отражения дна

Определение коэффициента отражения дна по данным лидарного зондирования требует пересчета пиковой мощности модельного оптического сигнала в величину максимума регистрируемого лидарного отклика, обусловленного отражением лазерного импульса от дна.

В случае зондирования «в надир» форма оптического сигнала  $I_{\text{nadir}}(t)$  при отражении от плоского дна океана на глубине  $h_b$  повторяет форму зондирующего лазерного импульса (растяжкой импульса за счет рассеяния в среде мы здесь пренебрегаем):

$$I_{\text{nadir}}(t + t_{\text{nadir}}) = W_{\rho} \cdot l_1(t); \quad t_{\text{nadir}} = \frac{2}{c} H - \frac{2n}{c} h; \quad W_{\rho} = W_0 \cdot \frac{\rho}{\pi} \cdot L_{\text{nadir}}(h_b), \quad (18)$$

где  $W_0$  и  $W_{\rho}$  – пиковые мощности излучаемого и отраженного импульса, соответственно;  $H$  – высота полета носителя лидарной системы,  $\rho$  – коэффициент отражения дна, а функция  $L_{\text{nadir}}(h_b)$  учитывает ослабление лазерного пучка при распространении ко дну и обратно. Для наиболее распространенного случая наклонного зондирования  $t_{\text{nadir}}$  и  $L_{\text{nadir}}$  в (19) заменяются на  $t_{\text{slant}}$  и  $L_{\text{slant}}$ , соответственно, для учета эффективной длины трассы распространения в атмосфере и в морской воде; кроме того, форма отраженного импульса изменяется за счет эффекта «растяжки»:

$$I_{\text{slant}}(t + t_{\text{slant}}) = W_{\rho} \cdot l_1(t) * \mathcal{E}(t); \quad t_{\text{slant}} = \frac{2}{c} H \sec \theta_a - \frac{2n}{c} h \sec \theta_w; \\ W_{\rho} = W_0 \cdot \frac{\rho}{\pi} \cos^2 \theta_w \cdot L_{\text{slant}}(h_b), \quad (19)$$

где  $\theta_a$  и  $\theta_w$  – углы отклонения оси зондирующего пучка от вертикали в воздухе и в воде, соответственно; функция  $\mathcal{E}(t)$  зависит как от оптических характеристик воды, так и от параметров оптической системы лидара. При известных  $W_0$  и  $L_{\text{slant}}(h_b)$  проблема оценки коэффициента отражения дна сводится к определению величины  $W_{\rho}$ .

Промежуточный сигнал (4), соответствующий оптическому импульсу  $I_{\text{slant}}$ , есть

$$J(t) = \int_0^{\infty} I_{\text{slant}}(t + t_{\text{nadir}} - t') \cdot \mathcal{Q}(t') dt' = W_{\rho} \cdot |l_1| \cdot \mathcal{E}(t) * \mathcal{Q}(t) * \mathcal{E}(t) = W_{\rho} \cdot |l_1| \cdot \mathcal{R}(t) * \mathcal{E}(t), \quad (20)$$

и регистрируемое пиковое значение  $S_{\text{max}}$  выходного сигнала выражается, в силу (1), через максимум этой функции:

$$S_{\text{max}} = \chi[\max J(t)]; \quad \max J(t) = W_{\rho} \cdot |l_1| \cdot \max \{\mathcal{R}(t) * \mathcal{E}(t)\}. \quad (21)$$

Используя обращение характеристики приемно-усилительного тракта  $\chi[\cdot]$ , из (21) немедленно получаем

$$W_{\rho} = \frac{\chi^{-1}(S_{\text{max}})}{|l_1| \cdot \max \{\mathcal{R}(t) * \mathcal{E}(t)\}}. \quad (22)$$

С учетом связи (13) между характеристикой  $\chi[\cdot]$  и калибровочной кривой  $C(\cdot)$  полученная формула может быть переписана в виде

$$W_{\rho} = M \cdot C^{-1}(S_{\text{max}}); \quad M = \frac{\max \{\mathcal{R}(t)\}}{\max \{\mathcal{R}(t) * \mathcal{E}(t)\}}, \quad (23)$$

причем фактор  $M$ , учитывающий временную растяжку отраженного импульса как за счет наклонного зондирования, так и за счет конечности полосы пропускания приемно-усилительного тракта лидара, может, в зависимости от глубины и свойств морской воды, достигать значений 2–3. Соответственно, пренебрежение этим эффектом может приводить к завышенным в 2–3 раза оценкам коэффициента отражения дна.

## Заключение

Количественное сравнение теоретических моделей лидарного отклика с практическими данными, полученными при зондирования толщи морской воды с помощью авиационных лидарных систем, требует адекватного описания преобразования входных оптических импульсов в выходные сигналы приемно-усилительного тракта системы. Предложенная модель указанного преобразования учитывает ограниченность полосы пропускания (конечность времени отклика) канала регистрации и нелинейность, обусловленную необходимостью сжатия динамического диапазона сигналов. Важно, что параметры модели могут быть определены по результатам простых калибровочных измерений системы, не требующих специального оборудования. Рассмотрены применения разработанной модели для решения проблемы оценки гидрооптических характеристик морской воды и коэффициента отражения дна по данным дистанционного лазерного зондирования толщи океана.

Развитый подход может быть полезным и в других задачах, связанных с измерением коротких импульсных оптических сигналов при помощи инерционных нелинейных регистрирующих приборов.

Авторы благодарны компании Optech Inc. (Канада) за предоставление данных калибровочных измерений лидара SHOALS до их опубликования в Proceedings of SPIE.

## Литература

1. Hickman G.D., Hogg J.E. Application of an airborne-pulsed laser for near shore bathymetric measurements. // Remote Sensing of Environment. 1969. V.1. №1. 47–58.
2. Feigels V.I., Kopilevich Yu.I. (Editors). Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice. // Proc. SPIE. 1996. V. 2964.
3. Шифрин К.С. Введение в оптику океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1983.
4. Feygels V.I., Kopilevich Yu.I., Surkov A.G., Yungel J., Behrenfeld M. Airborne lidar system with variable field-of-view receiver for water optical properties measurement. // Proc. SPIE. 2004. V. 5155. 12–21.
5. Kopilevich Yu.I., Feigels V.I., Surkov A.G. Mathematical modeling of input signals for oceanographic lidar systems. // Proc. SPIE. 2004. V. 5155. 30–39.
6. Feygels V.I., Wright C. W., Kopilevich Yu.I., Surkov A.G. Narrow-field-of-view bathymetric lidar: theory and field test. // Proc. SPIE. 2004. V. 5155. 1–11.
7. LaRocque P.E., Banic J.R., A. Cunningham G. Design description and field testing of the SHOALS-1000T airborne bathymeter. // Proc. SPIE. 2004. V. 5412. 162–184.

**МЕТОДИКА ВЫБОРА СПОСОБА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ  
РЕКУПЕРАЦИИ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОПРИВОДА  
ПОСТОЯННОГО ТОКА С ШИП****П.А. Борисов, В.С. Томасов**

Излагаются результаты анализа электромагнитных и энергетических процессов в энергетическом канале замкнутой системы электропривода на базе ШИП – ДПТ. Установлены расчетные соотношения, связывающие относительные значения напряжения на конденсаторе СФ с режимами работы и параметрами всего электропривода.

**Введение**

Современные системы автоматизированного электропривода проектируются на базе двух подсистем – энергетической и информационной. Энергетическая подсистема (ЭП) включает в себя силовые цепи первичного источника питания, полупроводникового и электромеханического преобразователей и осуществляет двухсторонний обмен энергией между первичным источником питания и электрической машиной посредством коммутации силовых ключей. Информационная подсистема включает в себя систему управления полупроводниковым преобразователем с информационно-измерительной частью и осуществляет реализацию заданного алгоритма регулирования координат электропривода [1, 2].

При построении энергоподсистем замкнутых систем электропривода постоянного тока (ЗС ЭППТ) с широтно-импульсными преобразователями (ШИП) остро встают вопросы выбора их структуры и параметров элементов в зависимости от типа первичного источника питания, характера и режимов работы нагрузки. Наиболее массовое практическое применение в регулируемых электроприводах получили двухзвенные преобразователи с промежуточным звеном постоянного тока (ЗПТ) [1]. В современных системах электропривода постоянного тока энергетическая подсистема, если нет необходимости в автономном источнике питания, включает в себя силовые цепи сети переменного тока, выпрямитель (диодный или на управляемых ключах), силовой фильтр (СФ), тормозную цепь (ТЦ), силовой каскад транзисторного ШИП, двигатель постоянного тока (ДПТ).

При торможении электропривода кинетическая энергия, которой обладают вращающиеся массы привода в начальный момент торможения, превращается в электрическую энергию и возвращается в звено постоянного тока. Избыточную энергию необходимо аккумулировать или преобразовывать в другую форму. Принципиально существует три возможности:

- аккумулирование (запас) энергии в конденсаторе силового фильтра;
- использование тормозной цепи, состоящей из прерывателя и тормозного сопротивления (преобразование энергии в тепло);
- рекуперация (возврат) энергии в сеть посредством инвертора рекуперации (использование электрической энергии другим пользователем);

Разработанная в статье методика позволяет выбирать наиболее эффективный способ использования энергии рекуперации и правильно определять структуру ЗПТ ЗС ЭППТ.

## Методика выбора способа использования энергии рекуперации

Для правильного выбора и расчета параметров ЗПТ необходимо определить величины кинетической и электрической энергий и зависимости этих энергий от параметров системы электропривода в типовых режимах работы. Основные расчетные соотношения установлены в работах [3, 4] для типовых режимов ЗС ЭППТ с ШИП: движения следящего вала по гармоническому закону, периодического реверса скорости с выходом в зону ограничения тока якоря на заданном уровне  $\bar{I}_0$ . Полученные зависимости позволяют соотнести энергию рекуперации  $W_{PEK}$  к суммарной энергии  $W_{\Sigma}$  за период изменения скорости и определить целесообразность использования инвертора рекуперации в составе ЭП ЗС ЭППТ с ШИП. Если энергия рекуперации невелика, то ее аккумулирование или рассеяние в тормозной цепи более целесообразно, чем возврат в сеть.

При проектировании энергоподсистемы необходимо определить максимальные электромагнитные нагрузки на ее элементы [1]. Наиболее тяжелым режимом работы ЗС ЭППТ с ШИП, при котором электромагнитные нагрузки на элементы ЭП максимальны, является режим периодического реверса скорости с выходом в зону токоограничения [3]. Для данного режима графики зависимости соотношения энергии рекуперации  $W_{PEK}$  к сумме энергий за период  $T_{3AD}$  реверса скорости от режима работы и параметров электропривода приведены на рис. 1, где  $I_{CT}$  – ток, обусловленный статическим моментом нагрузки  $M_{CT} = c_M^1 I_{CT}$ . За базовые величины в методике приняты:  $I_B = I_{K3} = U_B / r_A$ ,  $\Omega_B = \Omega_{XX} = c_E^1 E_B$ ,  $M_B = c_M^1 I_{K3}$ ,  $P_B = U_B I_B$ ,  $W_B = P_B T_M$ , где  $T_M = J_{\Sigma} \Omega_B / M_B$  – электромеханическая постоянная времени ДПТ,  $J_{\Sigma}$  – приведенный момент инерции ДПТ с нагрузкой,  $r_A$  – сопротивление обмотки якоря,  $c_M^1$  и  $c_E^1$  – конструктивные коэффициенты.

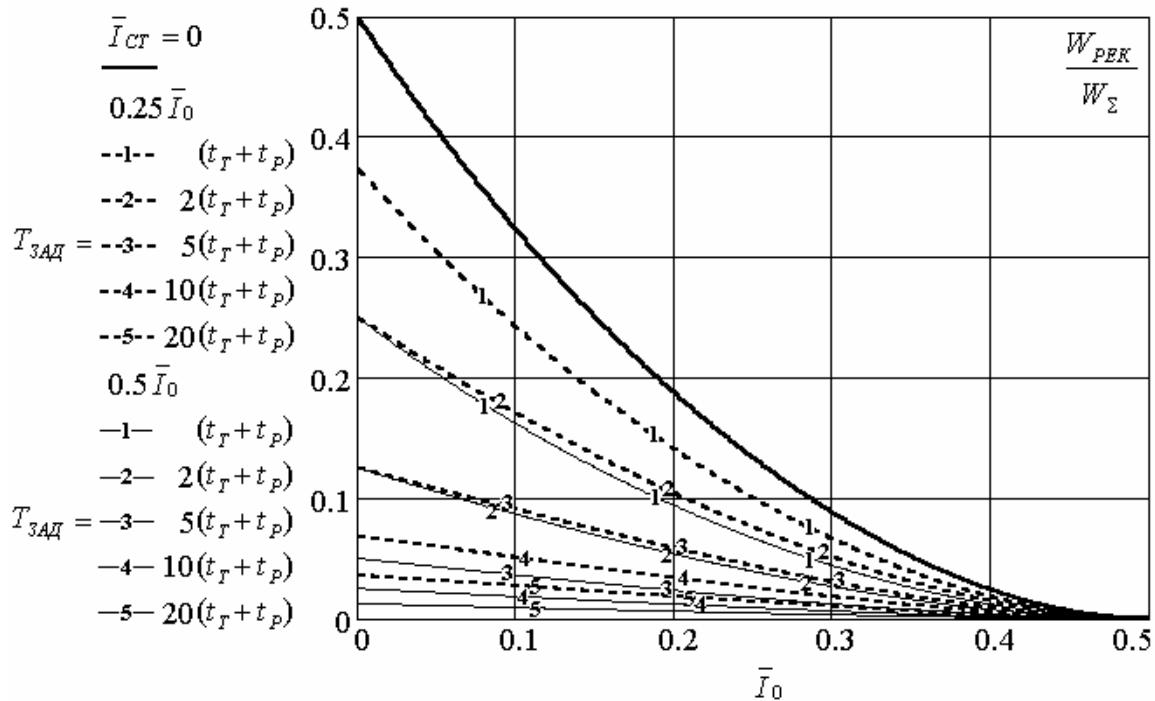


Рис. 1. Зависимости соотношения энергии рекуперации  $W_{PEK}$  к сумме энергий за период  $T_{3AD}$  для режима периодического реверса скорости с выходом в зону токоограничения

Времена торможения и разгона ДПТ определяются согласно выражениям

$$t_T = \frac{\bar{\Omega}_y}{\bar{I}_0 + \bar{I}_{CT}} T_M, \quad (1)$$

$$t_P = \frac{\bar{\Omega}_y}{\bar{I}_0 - \bar{I}_{CT}} T_M. \quad (2)$$

Основным требованием к замкнутой скоростной системе подчиненного регулирования является воспроизведение заданной скорости с требуемой точностью, поэтому для данного режима необходимо выполнять условие:

$$T_{34\Delta} \geq t_T + t_P = \frac{2\bar{\Omega}_y \bar{I}_0}{\bar{I}_0^2 - \bar{I}_{CT}^2} T_M \quad (3)$$

Решающими факторами при расчете и выборе параметров СФ являются обеспечение надежной коммутации силовых ключей ШИП и прием энергии рекуперации. Минимальное значение емкости конденсатора СФ определяется исходя из высокочастотных (коммутационных) процессов в ШИП [1]. Высокочастотные пульсации напряжения на конденсаторе СФ являются функцией относительной продолжительности включения цепи нагрузки в цепь источника питания и достигают максимума при  $\gamma = 0,5$  [5]:

$$\Delta U_{C_{\max}} = \frac{0,25 I_{\mathcal{A}_{\max}}}{f_K C_\phi}, \quad (4)$$

где  $f_K$  – частота коммутации ШИП,  $C_\phi$  – емкость конденсатора СФ. Для режима ограничения тока, когда  $I_{\mathcal{A}_{\max}} = I_0$ , получим:

$$C_{\phi_{\min}} = \frac{0,25 I_0}{\Delta U_{C_{\max}} f_K}. \quad (5)$$

Исходя из низкочастотных процессов в ЭП ЗС ЭППТ, когда ТЦ и ИР не используются, величина емкости конденсатора СФ определяется из условия ограничения напряжения на нем при рекуперации на заданном уровне  $\bar{U}_{C_{\max \text{ зад}}}$ :

$$C_{\phi_1} = \frac{T_M \bar{U}_\Delta^2 - \frac{2\bar{I}_{CT}}{pf_H}}{r_{\mathcal{A}} (\bar{U}_{C_{\max \text{ зад}}}^2 - 1)}, \quad (6)$$

где  $\bar{U}_\Delta^2 = \frac{\bar{I}_0 (\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0)^2}{(\bar{I}_0 + \bar{I}_{CT})}$ . Исходя из мощности, потребляемой двигателем на интервале разгона, емкость конденсатора СФ выбирается согласно выражению

$$C_{\phi_2} = \frac{2\bar{I}_0}{r_{\mathcal{A}} (1 - \bar{U}_{C_{\min}}^2) pf_H}, \quad (7)$$

где  $f_H$  – частота сети переменного тока,  $p$  – пульсность схемы выпрямления,  $\bar{U}_{C_{\min}}$  – минимально допустимое снижение напряжения на конденсаторе СФ на интервале разгона.

Применение тормозной цепи целесообразно при  $C_{\phi_1} > C_{\phi_2}$ , что позволяет уменьшить емкость конденсатора СФ до  $C_{\phi_2}$ . Выбор параметров ТЦ производится из условия ограничения напряжения на конденсаторе СФ при рекуперации на заданном уровне  $\bar{U}_{C_{\max \text{ зад}}}$ . Время включения тормозной цепи  $t_0$  определяется из равенства

$$(\bar{U}_{C_{\max \text{ зад}}}^2 - \bar{U}_{C_y}^2) \frac{r_{\mathcal{A}} C_{\phi_2}}{T_M} = \bar{U}_\Delta^2(t_0), \quad (8)$$

где  $\bar{U}_{C_y}^2 = 1 - \frac{2\bar{I}_{CT}}{r_{\mathcal{A}} C_{\phi_2} pf_H}$ ,  $\bar{U}_\Delta^2(t_0) = [2(\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0) - (\bar{I}_0 + \bar{I}_{CT}) \frac{t_0}{T_M}] \bar{I}_0 \frac{t_0}{T_M}$ .

Энергия и рассеиваемая мощность в ТЦ составляют

$$W_{TQ} = \frac{C_{\phi 2} U_{C \max \text{ зад}}^2}{2} \left( \frac{U_{C \max}^2}{U_{C \max \text{ зад}}^2} - 1 \right), \quad (9)$$

$$P_{TQ} = W_{TQ} / (t_{PEK} - t_0), \quad (10)$$

где  $t_{PEK} = \frac{\bar{\Omega}_y - \bar{I}_0}{\bar{I}_0 + \bar{I}_{CT}} T_M$ ,  $\bar{U}_{C \max} = \sqrt{\bar{U}_{C_y}^2 + \bar{U}_{\Delta}^2} \frac{T_M}{r_{\mathcal{R}} C_{\phi 2}}$ . Сопротивление тормозного резистора выбирается согласно выражению

$$R_{TQ} = U_{C \max \text{ зад}}^2 / P_{TQ}. \quad (11)$$

При этом действующее значение тока в ТЦ определяется как

$$I_{TQ \text{ rms}} = \sqrt{P_{TQ} / R_{TQ}}. \quad (12)$$

## Моделирование замкнутой системы электропривода постоянного тока с ШИП

Моделирование ЗС ЭППТ с ШИП производится по уравнениям состояния [6], а также возможна реализация структурно-имитационной модели, для создания которой использовались возможности одного из наиболее удобных и эффективных на сегодняшний день интегрированных пакетов MATLAB/Simulink. Модель информационной подсистемы реализуется в пакете на основе типовых звеньев: масштабирующих усилителей, интеграторов, сумматоров и т.п. Имитационная модель энергетической подсистемы реализуется с использованием библиотеки SimPowerSystems. Структура модели и ее элементов, выполненных в виде подсистем (subsystems), приведена на рис. 2.

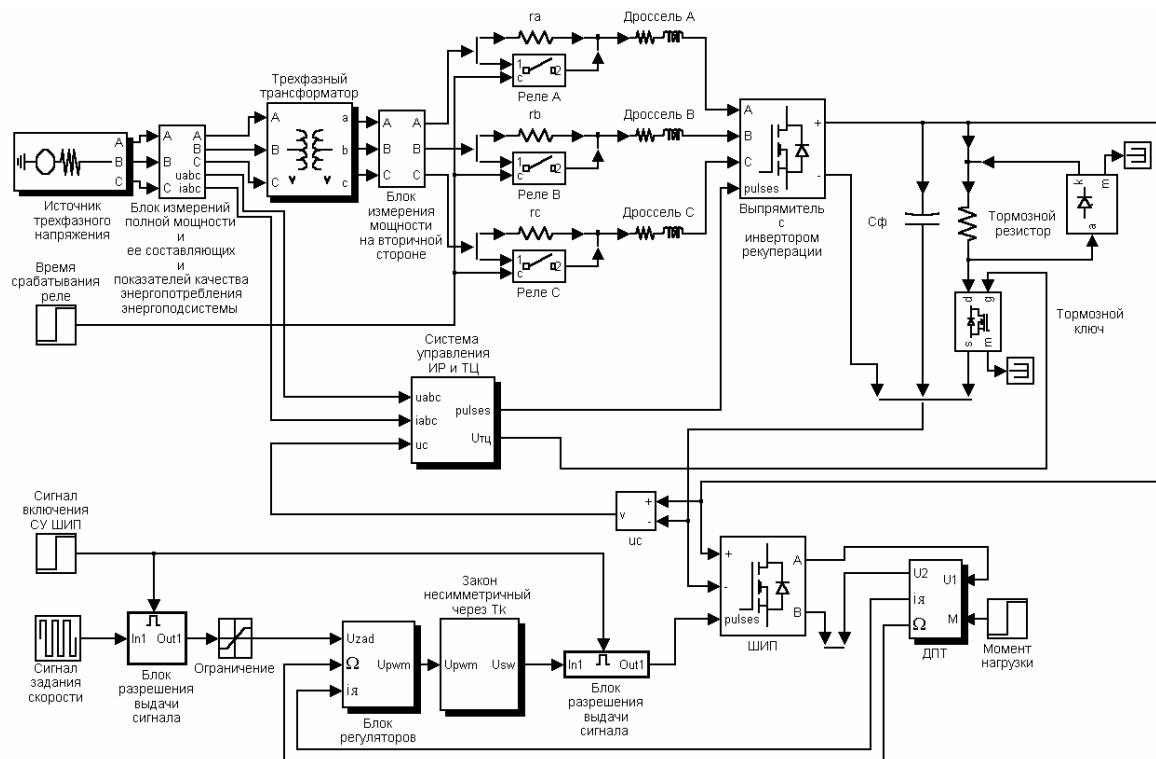


Рис. 2. Модель замкнутой системы электропривода постоянного тока с ШИП

Результаты моделирования ЗС ЭППТ с ШИП, питающейся от трехфазной сети переменного тока промышленной частоты ( $f_H = 50$  Гц) через неуправляемый мостовой выпрямитель ( $p = 6$ ), приведены на рис. 3 в виде осциллограмм напряжения на кон-

денсаторе СФ  $\bar{u}_{C\phi}$ , тока якоря  $\bar{i}_\alpha$ , скорости  $\bar{\Omega}$  (в базовых единицах). При моделировании использовались: параметры машины ПБВ-100М –  $U_B = 52$  [В],  $I_{HOM} = 18$  [А],  $r_\alpha = 0,222$  [Ом],  $L_\alpha = 1,4$  [мГн],  $c_E = 0,46$ ,  $c_M = 0,4$ ; параметры системы управления – двухконтурная скоростная с настройкой на «симметричный оптимум»,  $f_K = 10$  кГц, уровень ограничения тока якоря  $I_0 = 2I_{HOM}$ ,  $\bar{\Omega}_v = 1 - \bar{I}_0$ ; остальные числовые параметры –  $I_{CT} = I_{HOM}/2$ ,  $T_M = 0,01$  [сек],  $T_{34Д} = 0,16$  [сек],  $f_{34Д} = 1/T_{34Д} = 6,25$  [Гц],  $\bar{U}_{C\min} = 0,95$ ,  $\bar{U}_{C\max\,зад} = U_{C\max\,зад}/U_B = 63B/52B = 1,212$ ,  $C_{\phi 1} = 34,5$  [мФ],  $C_{\phi 2} = 24$  [мФ],  $W_{TЦ} = 6,63$  [Дж],  $P_{TЦ} = 345$  [Вт],  $R_{TЦ} = 11,5$  [Ом]. Для первоначального заряда емкости СФ используется цепь запуска, которая в реальных системах служит для ограничения токовых нагрузок на вентили выпрямителя и конденсатор СФ при включении ЭП в питающую сеть.

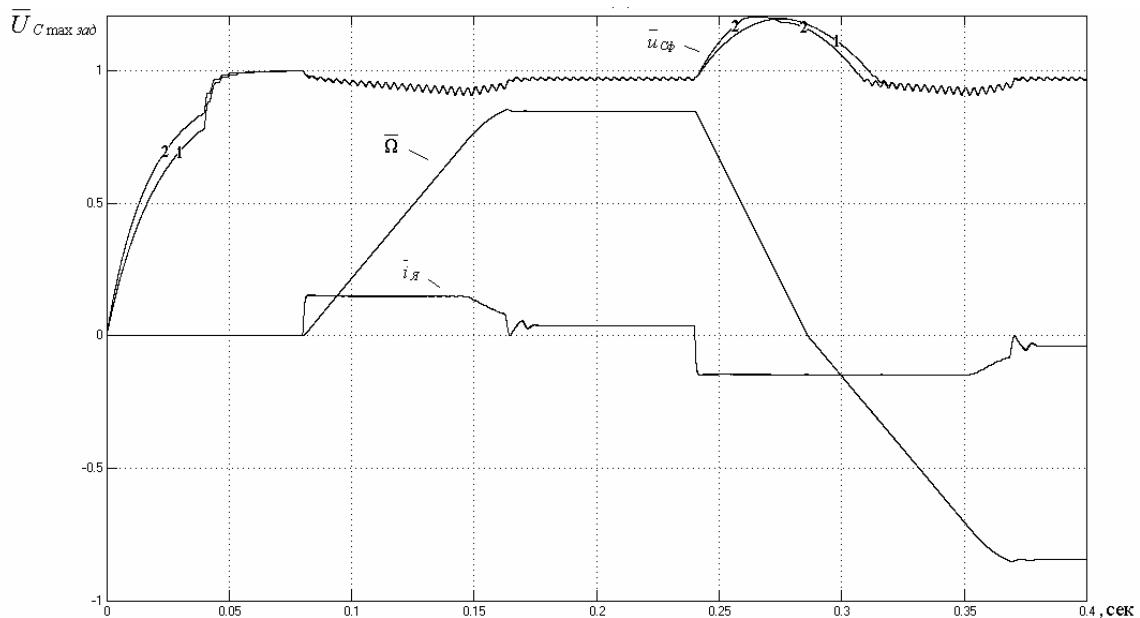


Рис. 3. Осциллограммы напряжения на конденсаторе СФ  $\bar{U}_{C\phi}$ , тока якоря  $\bar{i}_\alpha$ , скорости  $\bar{\Omega}$  в ЭП ЗС ЭППТ при работе в режиме периодического реверса скорости с выходом в зону токоограничения: 1 – без использования ТЦ, 2 – с использованием ТЦ

### Заключение

Разработанная методика позволяет выбирать наиболее эффективный способ использования энергии рекуперации при заданных условиях работы электропривода, а моделирование ЗС ЭППТ с ШИП подтверждает достоверность результатов расчета.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации в рамках работ, выполненных по гранту А03-3.14-171.

### Литература

- Глазенко Т.А., Томасов В.С. Состояние и перспективы применения полупроводниковых преобразователей в приборостроении. // Изв. вузов. Приборостроение. 1996. Т. 39. № 3. С. 5.
- Рабинович Л.В., Петров Б.И., Терсков В.Г., Сушков С.А., Панкратьев Л.Д. Проектирование следящих систем. / Под общ. ред. Л.В. Рабиновича. М.: Машиностроение, 1969. 500 с.; ил.

3. Томасов В.С., Серебряков С.А., Борисов П.А. Электромагнитные процессы в силовой цепи источника питания транзисторного ШИП, работающего в замкнутой системе электропривода. // Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т. 45. № 8. С. 42–50.
4. Томасов В.С., Синицын В.А., Борисов П.А. Исследование электромагнитных процессов в энергетическом канале замкнутой системы электропривода постоянного тока. // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 11. С. 9–16.
5. Глазенко Т.А. Импульсные полупроводниковые усилители в электроприводах. М.: Энергия, 1965. 186 с.; ил.
6. Борисов П.А., Томасов В.С. Расчет и моделирование электромагнитных процессов в силовой цепи замкнутой системы электропривода постоянного тока с ШИП. XXIX Неделя науки СПбГТУ. Ч. V: Материалы межвузовской научной конференции. СПб.: Изд-во СПбГТУ, 2001. С. 112–113.

# СИНТЕЗ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ИМПУЛЬСНОГО ИСТОЧНИКА ТОКА С ИНДУКТИВНО-ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ

## В.А. Толмачев, М.В. Никитина

Сформулирована методика синтеза адаптивной системы управления источника тока с  $N$ -модульным усилительно-преобразовательным устройством на основе транзисторных широтно-импульсных преобразователей из условия обеспечения заданного быстродействия при заданном уровне пульсаций тока в нагрузке и ограниченной частоте коммутации силовых ключей.

### Введение

Проблема построения систем управления современными источниками электропитания с высокими динамическими показателями относится к числу актуальных проблем электронного приборостроения. Существенно поднять как энергетические, так и динамические характеристики источников позволяет использование в энергетических подсистемах транзисторных широтно-импульсных преобразователей (ШИП). Максимально допустимая частота коммутации силовых ключей ШИП определяет в конечном итоге предельные динамические характеристики таких источников [1]. При ограниченной частоте коммутации использование в системе управления многомодульных усилительно-преобразовательных устройств (УПУ) с многофазным принципом синхронизации составляющих ШИП позволяет повысить предельные динамические показатели источника. Технические требования и принципы построения таких систем управления рассмотрены в работе [2]. В этой же работе отмечено, что высокие требования к точности поддержания тока заданной формы в нагрузке могут быть реализованы у источников, построенных на основе транзисторных ШИП с замкнутой системой регулирования тока.

В работе [3] изложена методика параметрического синтеза одноконтурной системы управления источника тока с  $N$ -модульным УПУ на основе транзисторных ШИП, индуктивно-емкостным сглаживающим фильтром и ПИД-регулятором из условия обеспечения заданного максимального времени фронта выходного импульса  $t_\phi$  с верхней границей диапазона задаваемых амплитуд  $I_{z\max}$ , заданных максимально допустимых амплитуд пульсаций тока нагрузки  $\Delta I_{h\text{ доп}}$  в квазиустановившемся режиме работы и заданной частоте коммутации силовых ключей.

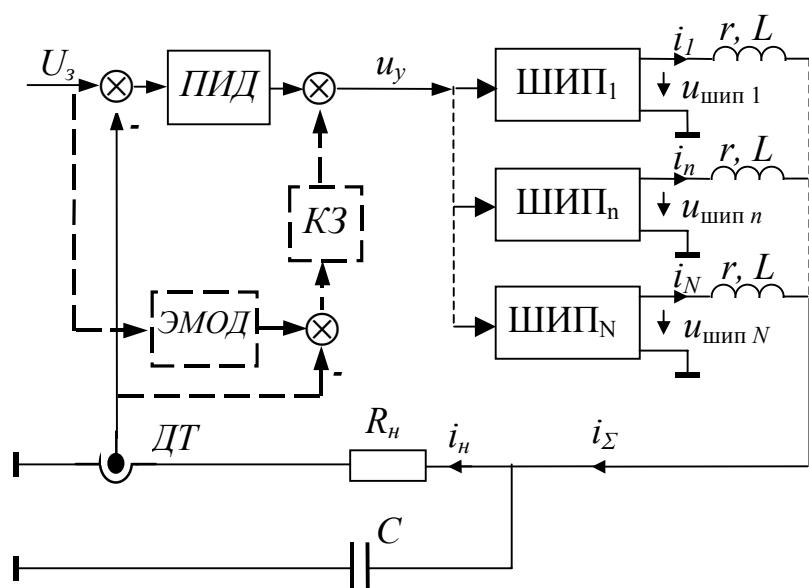


Рис. 1. Структурная схема

Упрощенная структурная схема такой системы представлена на рис/ 1. Система содержит  $N$  реверсивных ШИП с многофазным принципом синхронизации, работающих на общую нагрузку резистивного характера  $R_h$ , и один контур регулирования тока нагрузки  $i_h$ . Каждый ШИП содержит выходной каскад мостового типа на четырех транзисторных ключах  $CK1-CK4$  с напряжением питания  $U_n$  и широтно-импульсный модулятор (ШИМ), осуществляющий коммутацию силовых ключей с постоянным периодом  $T_k$  по несимметричному закону и обеспечивающий модуляцию второго рода и глубину модуляции  $M=0.5$ . Напряжение на нагрузке имеет вид импульсов с амплитудой  $U_n$ , относительной длительностью  $\gamma$ , пропорциональной величине выходного сигнала  $u_y$  ПИД-регулятора тока, и полярностью, определяемой полярностью последнего. На входе регулятора осуществляется сравнение напряжения  $U_3$ , пропорционального заданному значению тока нагрузки  $I_3$ , и напряжения  $u_{oc}$ , поступающего с датчика тока  $DT$  с коэффициентом передачи  $k_{dt}$  и пропорционального истинному значению тока нагрузки. В представленной структуре сглаживание пульсаций тока нагрузки  $i_h$  осуществляется разделительными дросселями каналов с параметрами  $r$ ,  $L$  и конденсатором  $C$ .

Указанная в работе [3] методика синтеза предполагает выбор числа каналов  $N$ , параметров фильтра ( $C$  и  $L$ ) и ПИД-регулятора ( $k_n$ ,  $T_u$  и  $T_d$ ), обеспечивающих заданный эталонный процесс при неизменных параметрах силовой цепи источника ( $R_h$  и  $U_n$ ).

Актуальной является задача сохранения заданных статических и динамических характеристик источников в условиях изменения как сопротивления нагрузки  $R_h$ , так и напряжения  $U_n$  источника питания силового каскада ШИП. Решение такой задачи возможно в структурах систем с адаптивными алгоритмами управления.

### Непрерывная модель и передаточная функция адаптивной системы управления

Наиболее приемлемой для решения поставленной задачи с позиции простоты технической реализации является структура с эталонной моделью и сигнальной самонастройкой [4]. Для организации такой системы введем в структурную схему, представленную на рис. 1, дополнительный контур адаптации, содержащий эталонную модель ЭМОД и корректирующее звено  $K3$ , на вход которого поступает разность выходного напряжения эталонной модели и напряжения датчика тока нагрузки. Выходной сигнал корректирующего звена поступает на вход ШИМ, суммируясь с выходным напряжением ПИД-регулятора основного контура.

Пусть передаточная функция эталонной модели соответствует эквивалентной передаточной функции линейной непрерывной модели замкнутой системы, а параметры ПИД-регулятора которой рассчитываются из условия ее настройки на технический оптимум:

$$W_3(p) = \frac{1}{2\tau_v^2 p^2 + 2\tau_v p + 1}, \quad (1)$$

где  $\tau_v$  – малая некомпенсированная постоянная времени, связанная с заданным временем фронта приближенным соотношением  $\tau_v = t_\phi/4.7$ .

Если передаточную функцию корректирующего звена в контуре адаптации выбирать в соответствии с выражением  $W_k(p) = k_a \cdot W_p(p)$ , где  $k_a$  – коэффициент пропорциональности,  $W_p(p)$  – передаточная функция ПИД-регулятора в эквивалентной непрерывной одноконтурной системе, то структурная схема эквивалентной непрерывной модели системы примет вид, показанный на рис. 2.

В указанной модели, составленной относительно усредненных гладких составляющих напряжений и токов, коэффициенты  $k_\phi$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  и  $k_{ship}$  определяются по формулам [3]

$$k_\phi = 1/(R_h + r/N),$$

$$a_1 = (\tau_L + \tau_c)/(1 + N \cdot R_h / r),$$

$$a_2 = \tau_L \cdot \tau_c / (1 + N \cdot R_h / r),$$

$$k_{\text{шип}} = U_{\text{п}}/U_{\text{он}},$$

где  $U_{\text{on}}$  – амплитуда опорного пилообразного напряжения ШИП,  $\tau_L=L/r$  – индуктивная постоянная времени,  $\tau_c=C \cdot R_h$  – емкостная постоянная времени.

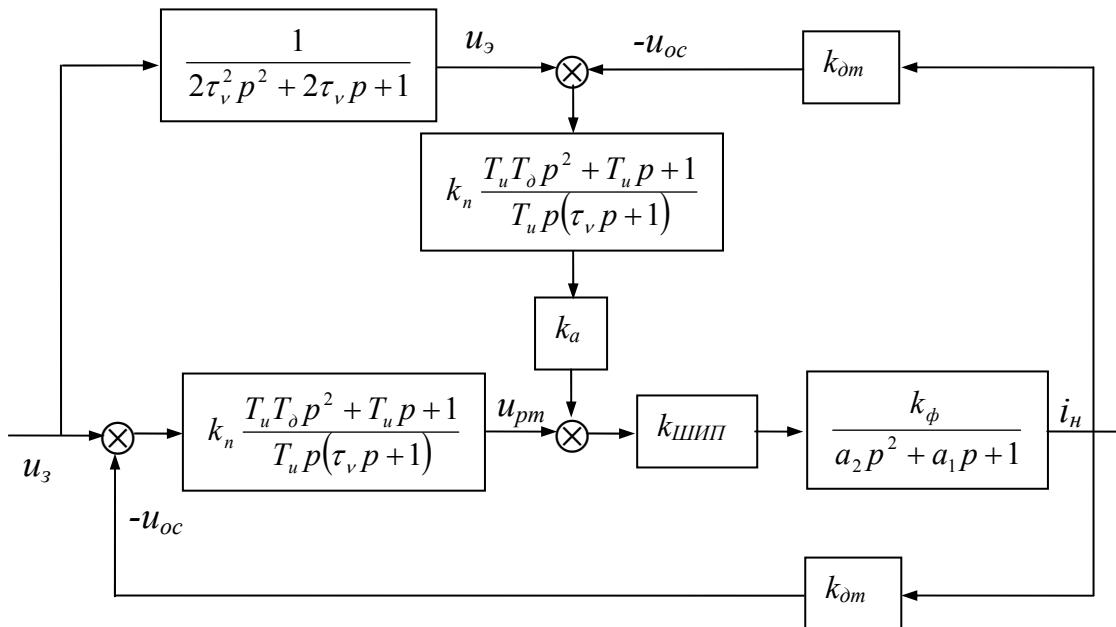


Рис. 2. Структурная схема эквивалентной непрерывной модели

Осуществляя эквивалентные структурные преобразования, а также вводя обозначения

$$\rho = R_h/R_{h0}, v = U_{\Pi}/U_{\Pi0}, K\rho = (R_{h0} \cdot N + r) / (R_{h0} \cdot N \cdot \rho + r), K\tau = (\tau_L + \rho \cdot \tau_c) / (\tau_L + \tau_c), \quad (2)$$

где  $R_{h0}$  и  $U_{p0}$  – параметры силовой цепи, при которых осуществляется расчет параметров ПИД-регуляторов ( $k_n$ ,  $T_u$  и  $T_d$ ) по [3],

$$k_n = a_1 / (2 \cdot \tau_v \cdot k_{\text{шип}} \cdot k_{\Phi} \cdot k_{\text{дт}}), \quad T_u = a_1, \quad T_{\partial} = a_2 / a_1,$$

передаточную функцию системы приведем к виду

$$W_a(p) = [W_1(p)/W_2(p)] \times [W_3(p)/k_{\partial m}], \quad (3)$$

где

$$W_1(p) = \frac{2 \cdot \tau_v^2 \cdot a_2}{k_a + 1} \cdot p^4 + \left( \frac{2 \cdot \tau_v^2 \cdot a_1}{k_a + 1} + \frac{2 \cdot \tau_v \cdot a_2}{k_a + 1} \right) \cdot p^3 + \left( \frac{2 \cdot \tau_v^2}{k_a + 1} + \frac{2 \cdot \tau_v \cdot a_1}{k_a + 1} + a_2 \right) \cdot p^2 + \\ + \left( \frac{2 \cdot \tau_v}{k_a + 1} + a_1 \right) \cdot p + 1, \quad (4)$$

$$W_2(p) = \frac{K\tau}{\nu} \cdot \frac{2 \cdot \tau_v^2 \cdot a_2}{k_a + 1} \cdot p^4 + \left( \frac{\rho}{\nu} \cdot \frac{2 \cdot \tau_v^2 \cdot a_1}{k_a + 1} + \frac{K\tau}{\nu} \cdot \frac{2 \cdot \tau_v \cdot a_2}{k_a + 1} \right) \cdot p^3 + \\ + \left( \frac{1}{\nu \cdot K\rho} \cdot \frac{2 \cdot \tau_v^2}{k_a + 1} + \frac{\rho}{\nu} \cdot \frac{2 \cdot \tau_v \cdot a_1}{k_a + 1} + a_2 \right) \cdot p^2 + \left( \frac{1}{\nu \cdot K\rho} \cdot \frac{2 \cdot \tau_v}{k_a + 1} + a_1 \right) \cdot p + 1. \quad (5)$$

Анализ выражения (3) с учетом выражений (1), (2), (4) и (5) показывает, что при номинальных параметрах силовой цепи (т.е.  $\rho=1$  и  $\nu=1$ ) передаточная функция системы соответствует эталонной при любом значении коэффициента  $k_a$ . При отличных от единицы коэффициентах  $\rho$ ,  $\nu$  и при достаточно высоком значении коэффициента  $k_a$  динамические характеристики адаптивной системы регулирования тока приближаются к соответствующим характеристикам эталонной модели (1). Таким образом, точность

поддержания эталонного экспоненциального процесса в условиях изменения параметров силовой цепи источника связана с предельным значением  $k_{a,np}$  коэффициента  $k_a$ .

### Синтез адаптивной системы управления

Одной из задач синтеза адаптивной системы с выбранной структурой является такой выбор настроек регуляторов, чтобы процесс изменения параметров силовой цепи при выбранном предельном значении коэффициента  $k_a$  не приводил к нарушению устойчивости системы (т.е. возникновению скользящего режима или режима субгармонических автоколебаний).

Даже в том случае, когда параметры процессов в замкнутой непрерывной системе соответствуют эталонным, в системе с ШИП и дополнительным контуром сигнальной самонастройки изменяются условия устойчивости относительно условий в исходной системе, поскольку появляется дополнительная обратная связь, по которой пульсации тока нагрузки поступают на вход ШИМ.

Пусть базовый ШИП источника обладает следующими характеристиками: суммарное омическое сопротивление выходного каскада, датчика тока и дросселя фильтра  $r=0.03$  Ом; номинальное напряжение питания выходного каскада  $U_{n,nom}=36$  В; номинальное сопротивление нагрузки  $R_{n,nom}=0.3$  Ом; период коммутации силовых ключей выходного каскада  $T_k=25$  мкс; амплитуда опорного пилообразного напряжения ШИМ  $U_{on}=10$  В; глубина модуляции  $M=0.5$ .

Поставим задачей обеспечение переходного процесса с временем фронта выходного импульса  $t_{\phi}=3T_k$  при реакции на скачок задающего воздействия величиной  $I_{зад\ макс}=50$  А при допустимой амплитуде пульсаций тока нагрузки  $\Delta I_{доп}\leq 1$  А в диапазоне изменения ее сопротивления нагрузки  $R_n$  от  $R_{n\ мин}=0.1$  Ом до  $R_{n\ макс}=0.5$  Ом при  $R_{n\ ном}=0.3$  Ом и диапазоне изменения напряжения  $U_n$  силового источника питания от  $U_{n\ мин}=32$  В до  $U_{n\ макс}=40$  В при  $U_{n\ ном}=36$  В.

В табл. 1 представлены результаты синтеза системы с вышеописанными характеристиками при различных параметрах силовой цепи по известной методике [3].

Таблица 1

Параметры системы: $U_n, B, R_n, \text{Ом}$	Численный результат				
	36	36	40	32	32
0.5	0.1	0.3	0.3	0.5	
$N$	2	2	2	2	2
$L, \text{мкГн}$	41.1	47.7	49.9	38.9	35.6
$C, \text{мкФ}$	3.7	12.5	5	5.4	3.9
$T_u, \text{мкс}$	40	207.5	79.2	61.7	34.7
$T_d, \text{мкс}$	1.9	1.2	1.5	1.6	2
$k_n$	0.358	0.415	0.391	0.316	0.35

Анализ результатов математического моделирования процессов при реакции рассматриваемой системы регулирования тока на скачок задающего воздействия показал, что наилучшее приближение переходного процесса к эталонному во всем диапазоне изменения параметров силовой цепи обеспечивается в системе, параметры регуляторов и фильтра которой выбираются при максимальном из всех возможных значений сопротивления нагрузки  $R_{n0}=R_{n\ макс}$  и наименьшем значении напряжения питания силовой цепи  $U_{n0}=U_{n\ мин}$ . Отметим также, что компенсация отклонения тока нагрузки от эталонного, обусловленного изменением указанных параметров, при таком выборе связана только с уменьшением относительной продолжительности включения нагрузки в цепь силового источника питания  $\gamma$ , и, следовательно, исключается выход в насыщение ШИП в динамических режимах работы источника.

Среднеквадратичное отклонение тока нагрузки для всех вышеописанных случаев, а также предельное значение коэффициента адаптации, определяемое по методике, описанной в работе [5], приведены в табл. 2. Как видно, предельное значение коэффициента адаптации неоднозначно связано с отклонениями изменяемых параметров относительно их значений в расчетной точке и от тока задания. Минимальное значение предельного коэффициента адаптации для данной системы  $K_a=5.3$ , однако оно не обеспечивает достаточное приближение переходного процесса к эталонному, т.е. среднеквадратичное отклонение тока нагрузки от эталонного превышает допустимое значение. Минимальное значение коэффициента адаптации, при котором среднеквадратичное отклонение тока нагрузки от эталонного соответствует допустимому уровню, равно  $K_a=6.6$ . При таком подходе следует ограничивать снизу диапазон регулирования тока нагрузки  $I_{\text{зад мин}}=5$  А.

Таблица 2

Настройка		Параметры		$K_a$ при $I_{\text{зад}}$			Среднеквадратичная ошибка для $I_{\text{зад}}=50$ А при $K_a$		
$U_{\text{n}0}$ , В	$R_{\text{h}0}$ , Ом	$U_{\text{n}}$ , В	$R_{\text{h}0}$ , Ом	50 А	5 А	0.5 А	0	5.3	6.6
36	0.5	36	0.5	13.1	12.3	9.9	0.38	0.36	0.35
36	0.5	36	0.1	12	11.1	10.9	64.63	1.79	1.37
36	0.1	36	0.1	10.9	10.9	9.7	0.54	0.33	0.32
36	0.1	36	0.5	8.7	6.9	6.6	69.73	5.71	3.97
40	0.3	40	0.3	12.6	12.6	11	0.26	0.19	0.18
40	0.3	32	0.3	14.9	14.8	13.1	7.49	0.58	0.45
32	0.3	32	0.3	13.5	11.2	9.9	0.2	0.14	0.13
32	0.3	40	0.3	9.8	10.2	7.4	4.69	0.5	0.44
32	0.5	32	0.5	8.9	12.3	8.7	0.31	0.28	0.27
32	0.5	40	0.1	7.7	6.6	5.3	91.54	2.48	1.89

Результаты математического моделирования процессов при реакции рассматриваемой системы регулирования тока на скачок задающего воздействия  $I_3=I_{\text{зад макс}}=50$  А в рекомендуемой точке настройки показаны на рис. 3, где  $i_3$  – эталонная кривая,  $i_{\text{h}1}$  – кривая тока нагрузки, соответствующая расчетным параметрам силовой цепи источника и регуляторов при  $K_a=0$ ,  $i_{\text{h}2}$ ,  $i_{\text{h}3}$  – кривые тока нагрузки, соответствующие расчетным параметрам регуляторов и отличных от расчетных значениях параметров силовой цепи соответственно при  $K_a=0$  и  $K_a=6.6$ ,  $i_1$ ,  $i_2$  – кривые токов дросселей каналов,  $u_y$  – кривая напряжения, поступающего на вход ШИП,  $u_{\text{on}1}$  – кривая опорного напряжения ШИП 1-го канала,  $u_{\text{шип}1}$  – кривая выходного напряжения ШИП 1-го канала.

## Выводы

1. Сохранение заданных динамических качеств системы управления регулируемого источника тока с транзисторным ШИП в условиях изменяющихся параметрах силовой цепи возможно при введении дополнительного контура сигнальной адаптации с эталонной моделью в виде апериодического звена второго порядка с малой некомпенсируемой постоянной времени  $\tau_v$  и ПИД-регулятором.

2. Параметрический синтез адаптивной системы управления можно производить, используя известную методику [3], если в качестве исходных параметров принять максимальное из возможных значений сопротивления нагрузки и минимальное из возможных значений напряжения силового источника питания.

3. Значение предельного коэффициента адаптации неоднозначно зависит от варьируемых параметров системы и тока задания. Минимальное значение предельного коэффициента адаптации, обеспечивающего достаточное приближение переходного процесса к эталонному, целесообразно определять на основе зависимостей предельного значения коэффициента адаптации  $K_{a\,np}$  от изменяемых параметров, полученных с использованием методики, приведенной в работе [5].

4. Для обеспечения устойчивости при таком подходе следует ограничивать снизу диапазон регулирования тока нагрузки.

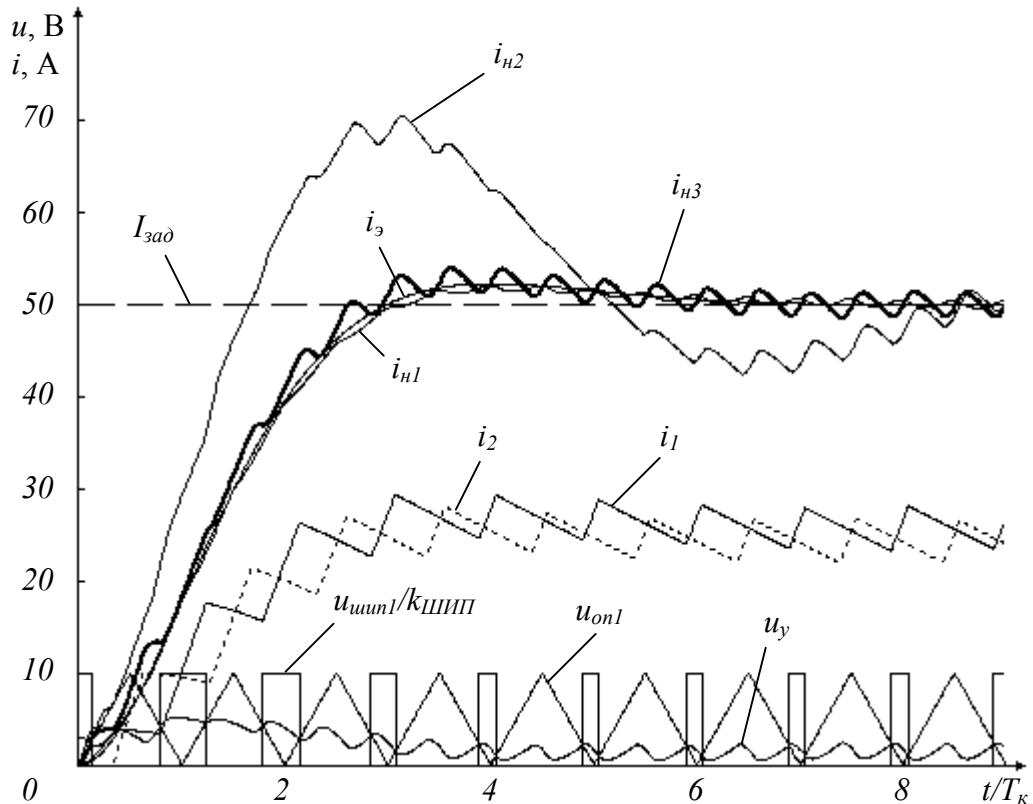


Рис. 3. Реакция системы на скачок задающего воздействия

### Литература

- Глазенко Т.А., Синицын В.А., Толмачев В.А. Сравнительный анализ динамических характеристик транзисторных широтно-импульсных преобразователей. // Электротехника. 1998. №3. С.70–75.
- Синицын В.А., Толмачев В.А., Томасов В.С. Принципы построения и пути совершенствования технических характеристик мощных источников электропитания с произвольной формой выходного параметра. // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 39. №4. С. 47–54.
- Никитина М.В., Толмачев В.А. К синтезу системы управления многомодульного источника тока. / Современные технологии: Сборник научных статей / Под ред. С.А. Козлова и В.О. Никифорова. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. С.276–285.
- Соловьев В.В., Шрамко Л.С. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями. // М. Машиностроение, 1972. 270 с.
- Толмачев В.А., Осипов Д.В. Анализ устойчивости к автоколебаниям на субгармонических частотах импульсных источников тока программируемой формы. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). Выпуск 3. Физические процессы, системы и технологии точной механики. СПб: Издательство СПбГИТМО (ТУ). 2001. С. 132–136.

# СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ НЕЙРОСЕТЕВЫХ УСТРОЙСТВ

## Д.В. Лукичев, А.А. Усольцев

В статье кратко описываются преимущества искусственных нейронных сетей и их недостатки, связанные с трудностями построения адекватного поставленной задаче нейросетевого устройства. Анализируются основные способы построения структуры искусственной нейронной сети, предлагается один из возможных подходов к решению задачи оптимизации нейросетевой модели.

### Введение

Разработка искусственных нейронных сетей (ИНС) началась еще в начале XX века с попыток моделирования работы человеческого мозга, но только во второй половине столетия, когда были преодолены некоторые теоретические барьеры, а вычислительные системы стали достаточно мощными, нейронные сети получили широкое признание [5].

Важнейшая особенность ИНС, свидетельствующая об их широких возможностях и огромном потенциале, состоит в параллельной обработке информации всеми звенями. При громадном количестве межнейронных связей это позволяет значительно ускорить процесс обработки информации. Кроме того, при большом числе межнейронных соединений сеть приобретает устойчивость к ошибкам, возникающим на некоторых линиях. Функции поврежденных связей берут на себя исправные линии, в результате чего деятельность сети не претерпевает существенных возмущений.

Другое, не менее важное свойство – способность к обучению и обобщению накопленных знаний. Нейронная сеть обладает чертами искусственного интеллекта. Натренированная на ограниченном множестве данных сеть способна обобщать полученную информацию и показывать хорошие результаты на данных, не использовавшихся в процессе обучения.

Характерная особенность сети состоит также в возможности ее реализации с применением технологии сверхбольшой степени интеграции. Различие элементов сети невелико, а их повторяемость огромна. Это открывает перспективу создания универсального процессора с однородной структурой, способного перерабатывать разнообразную информацию.

Использование перечисленных свойств на фоне развития устройств со сверхбольшой степенью интеграции (VLSI) и повсеместного применения вычислительной техники вызвало в последние годы огромный рост интереса к нейронным сетям и существенный прогресс в их исследовании. Однако, в сравнении с человеческим мозгом, искусственные нейронные сети сегодня представляют собой весьма упрощенные абстракции. На текущем этапе своего развития ИНС, наряду с преимуществами, имеют ряд недостатков, связанных, прежде всего, с трудностями создания нейросетевой модели, адекватной поставленной задаче. Поэтому возникает проблема синтеза оптимальной структуры ИНС с целью получения наилучших показателей при решении конкретной задачи.

### 1. Понятие искусственной нейронной сети и проблема синтеза ее архитектуры

Нейронная сеть является совокупностью элементов, соединенных некоторым образом так, чтобы между ними обеспечивалось взаимодействие. Эти элементы, называемые также нейронами или узлами, представляют собой простые процессоры, вычислительные возможности которых обычно ограничиваются некоторым правилом комбинирования входных сигналов и правилом активизации, позволяющим вычислить выходной сигнал по совокупности входных сигналов. Выходной сигнал элемента мо-

жет посыпаться другим элементам по взвешенным связям, с каждой из которых связан весовой коэффициент или вес. В зависимости от значения весового коэффициента передаваемый сигнал или усиливается, или подавляется. Математическая модель  $i$ -го нейрона, расположенного в  $l$ -ом слое ИНС, приведена на рис. 1 [4].

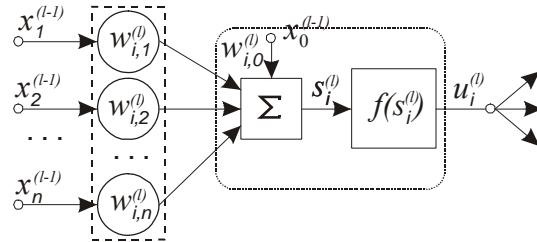


Рис. 1. Математическая модель нейрона

Таким образом, функционирование нейрона может быть описано уравнениями:

$$s_i = \sum_{k=1}^n w_{ik} x_i + w_{i0} x_0 = \sum_{j=0}^n w_{ij} x_j, \quad (1)$$

$$u_i = f(s_i).$$

где  $x_i$  – входные сигналы нейрона,  $u_i$  – выходной сигнал,  $w_{i,j}$  – весовые коэффициенты (веса),  $s_i$  – суммарное входное воздействие на нейрон,  $f()$  – активационная функция.

Активационная функция характеризует реакцию нейрона на входное воздействие  $s_i$ . На рис. 2 приводятся функции активации, получившие наибольшее распространение в ИНС [2].

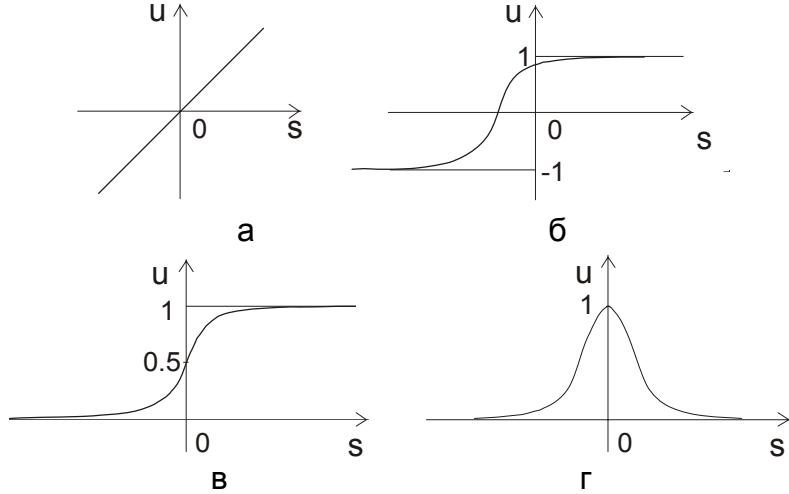


Рис. 2. Функции активации нейрона: а – линейная, б – гиперболического тангенса (сигмоидальная), в – логическая (сигмоидальная), г – экспоненциальная или радиально-базисная

Искусственные нейронные сети отличаются своей архитектурой – структурой связей между нейронами, числом слоев, функцией активации нейронов, алгоритмом обучения. Различные способы объединения нейронов между собой и организации их взаимодействия привели к созданию сетей разных типов. Среди множества существующих видов сетей в качестве важнейших можно выделить многослойные нейронные сети прямого распространения (многослойные персептроны), радиальные сети *RBF*, сети («самоорганизующиеся карты») Кохонена, а также рекуррентные сети, в которых

имеются сигналы обратной связи. Особую разновидность составляют нечеткие нейронные сети, функционирование которых основано на принципах нечеткой логики. Однако в настоящее время более 80% всех приложений нейронных сетей все еще относится к многослойным нейронным сетям прямого распространения, которые по сравнению с другими сетями отличаются большей теоретической проработкой [2, 5].

На рис. 3, а приводится структура многослойного персептрана, имеющего  $n$  нейронов во входном слое,  $m$  нейронов в выходном слое и  $k_i$  нейронов в  $(V-1)$  скрытых (внутренних) слоях ( $i = 1, 2, \dots, (V-1)$ ).

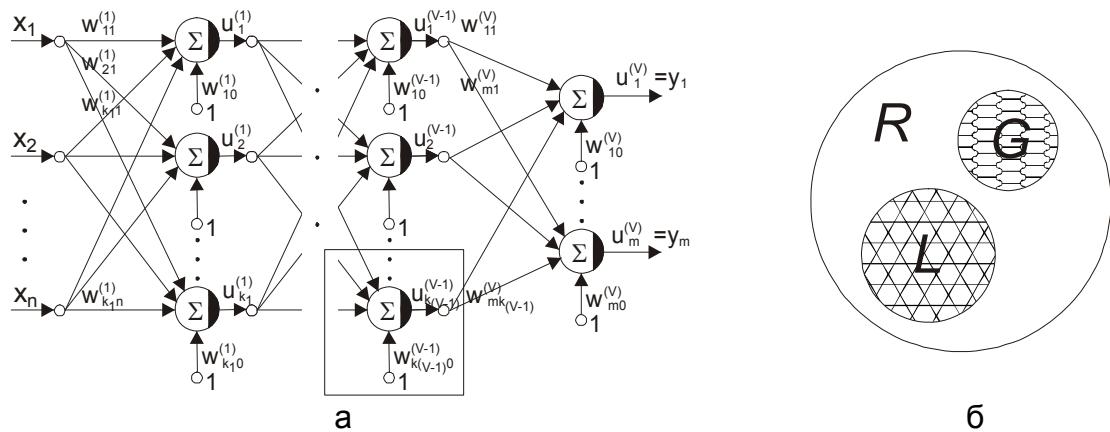


Рис. 3. Структура многослойного персептрана (а) и пространственное расположение множества данных, используемых для создания нейросетевой модели (б)

Для решения конкретной задачи в нейросетевом логическом базисе возникает проблема синтеза, связанная с определением оптимальной конфигурации нейронной сети. Самые общие положения о структуре синтезируемой нейронной сети можно найти в теореме Колмогорова-Арнольда-Хехт-Нильсена, а также в немногочисленных ее следствиях. Однако данная теорема не конструктивна. В ней не заложена методика определения числа нейронов в сети для некоторой конкретной обучающей выборки. Выбор структуры сети, количества скрытых слоев и числа параметров в каждом слое осуществляется, как правило, на основе опыта исследователя. Существуют лишь самые общие рекомендации относительно выбора структуры, а методы, в которых этот выбор осуществляется автоматически, еще не достаточно разработаны [2].

## 2. Синтез архитектуры нейронной сети и ее параметров

Рассмотрим в общем виде, что представляет собой задача обучения нейронной сети. Для построения и обучения нейронной сети обычно создается набор примеров (обучающая выборка), который представляет собой совокупность векторов вида  $(X, Y)$ , где  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – значения всех входов нейронной сети, а  $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$  – значения всех выходов нейронной сети, которые должны получаться в процессе ее работы. Структура эталонных векторов задает одновременно количество входных и выходных нейронов (в данном случае  $n$  и  $m$ , соответственно).

Целью обучения нейронной сети является подбор значений всех ее характеристик с целью достижения такой ситуации, когда при подаче на вход сети любого вектора  $X$  из набора примеров на ее выходе получается выходной вектор  $Y'$ , отличающийся от эталонного вектора  $Y$  не более чем на заданную заранее величину  $\delta$ . Достижение подобных целей формализуется критерием качества (функционалом или целевой функцией)  $E$ , минимальное значение  $\min_w E = \delta$  которого соответствует наилучшему решению поставленной задачи.

Основными характеристиками нейронной сети являются:

- количество скрытых слоев ( $V-1$ );
- количество нейронов в каждом из скрытых слоев  $k_i$  ( $i = 1, 2, \dots, (V-1)$ );
- веса входов каждого из скрытых и выходных нейронов  $w_{i,j}$ ;
- функция активации для каждого скрытого и выходного нейрона  $f()$ ;
- алгоритм обучения, связанный с методом подбора весовых коэффициентов сети.

Таким образом, можно обобщенно сформулировать оптимизационную задачу обучения нейронной сети. Исходными данными для нее будут количество входных и выходных нейронов, а также набор обучающих примеров. В результате решения этой задачи мы должны получить следующие значения:

- количество скрытых слоев;
- количество нейронов в каждом скрытом слое;
- значения весов всех входов для каждого скрытого и выходного нейрона;
- функции активации для каждого скрытого и выходного нейрона.

Синтез ИНС необходимо начинать с подготовки обучающих наборов данных, которые должны быть составлены так, чтобы сеть в наибольшей степени обладала бы свойством обобщения. В этом случае в результате отображения  $X \rightarrow Y'$  необходимо обеспечить формирование правильных выходных сигналов не только в соответствии со всеми примерами обучающей выборки, но и со всеми возможными входными сигналами, которые не вошли в данный набор примеров. Выполнение последнего условия проверяется на работе обученной ИНС с тестовой выборкой.

Разделение данных на обучающее и тестовое подмножества представлено на рис. 3, б. Множество данных  $R$ , на котором считается истинным некоторое правило или которое представляет собой данные заданного диапазона работы, разбито на подмножества  $L$  и  $G$ . Обучение проводится на примерах, составляющих подмножество  $L$ . Способность отображения сетью элементов  $L$  может считаться показателем степени накопления обучающих данных, тогда как способность распознавания данных, входящих во множество  $G$  и не использованных для обучения, характеризует ее возможности обобщения (генерализации) знаний. Данные, входящие и в  $L$ , и в  $G$ , должны быть типичными элементами множества  $R$ . В обучающем подмножестве не должно быть уникальных данных, свойства которых отличаются от ожидаемых (типичных) значений [4]. Погрешность обобщения, составляющая ошибку работы сети на множестве данных  $G$ , как правило, получается больше ошибки обучения, поэтому иногда целесообразно заранее задаваться критерием обучения  $\delta'$ , меньшим по величине (например, в 1.5 раза) допустимой по заданию погрешности  $\delta$ .

Свойство обобщения характеризуется тесной связью между количеством весов сети (числом степеней свободы) и количеством обучающих выборок. Число связей сети, в конечном счете, определяет размерность ИНС и время, требуемое для настройки всех ее коэффициентов, поэтому необходимо, чтобы длина обучающей выборки была минимальна, но при этом свойства обобщения на все множество  $R$  должны оставаться на заданном погрешностью  $\delta$  уровне.

Если в наличии имеется только обучающая выборка, с помощью которой необходимо синтезировать модель нейросетевого устройства (например, в отраслях промышленности, где накоплены огромные массивы данных о поведении исследуемого технического объекта), то для выполнения описанного выше условия необходимо провести предварительные эксперименты по определению характерных точек множества  $R$ , обучившись на которых, ИНС могла бы с допустимой погрешностью работать во всем заданном диапазоне. Иногда для этой цели исследование целесообразно проводить на модели упрощенного объекта или упрощенных сигналах [1]. Проверка характерных точек может проводиться на произвольно выбранной структуре ИНС, которая представляет собой, например, двухслойный персептрон с числом связей, в 10 раз меньшим ко-

личества наблюдений. На данном этапе также удобнее всего определять вид функций активации слоев, которые будут эффективнее при решении конкретной задачи. Однако необходимо помнить, что, определившись с характерными точками и/или зависимостями упрощенной модели, обучающую выборку необходимо составлять только на сигналах именно той системы, где предполагается работа ИНС.

Если объект и/или его модель, на которых получается обучающая выборка, известны, то можно задать такой режим их работы, при котором непрерывно записываемый через определенные интервалы массив данных будет содержать все характерные точки и/или режимы работы объекта, что исключает необходимость трудоемких исследований. После того как составлена обучающая выборка, требуется определить количество нейронов и слоев сети. Данные параметры характеризуются общим количеством связей, которое для достижения лучших обобщающих свойств должно быть минимально. Существующие способы настройки числа нейронов в процессе обучения можно разделить на две группы: алгоритмы редукции и алгоритмы наращивания [2].

В алгоритмах редукции в качестве исходной точки используется избыточная архитектура сети, которая в процессе обучения либо по его завершении упрощается путем исключения наименее значимых весов или нейронов. Алгоритмы редукции имеют, по крайней мере, два недостатка: 1) нет методики определения числа нейронов скрытых слоев, которое является избыточным, поэтому перед началом работы алгоритма нужно угадать это число; 2) в процессе работы алгоритма сеть содержит избыточное число нейронов, поэтому обучение идет медленно.

Принципиально иной подход используется при реализации алгоритмов наращивания. Он заключается в первоначальном включении в сеть небольшого количества скрытых нейронов (часто они вообще отсутствуют) и последовательном их добавлении по мере развития процесса обучения вплоть до достижения требуемого уровня натренированности сети на исходном множестве обучающих выборок. И хотя к недостаткам алгоритмов наращивания можно отнести экспоненциальный рост времени вычислений при увеличении размерности сети, именно этот метод целесообразнее использовать при настройке числа скрытых слоев и числа нейронов в них. На данном этапе одновременно с подбором перечисленных параметров осуществляется обучение сети и проверка ее функционирования на тестовом подмножестве. Такой подход необходим для нахождения компромиссного решения при минимизации критериев ошибки обучения и ошибки обобщения нейронной сети. В качестве базисной методики обучения предлагается подход, описанный в [3] для нейронной сети с переменной структурой. Этап обучения включает в себя  $N$  обучающих эпох. Если ошибка обучения сети при заданном количестве циклов обучения не превосходит допустимый порог (точность), то процесс обучения нейронной сети можно считать законченным, и проводится этап проверки с применением тестового подмножества. В противном случае добавляется нейрон в скрытый слой, и этап обучения повторяется. Данная методика может быть расширена и на ИНС, имеющие более одного скрытого слоя. Математически обосновано и экспериментально подтверждено, что увеличение числа скрытых слоев более двух не дает существенного улучшения точности распознавания входных образов, зато увеличивает трудоемкость обучения [4]. Поэтому при определении структуры ИНС имеет смысл рассматривать только двухслойные и трехслойные сети.

В качестве метода обучения в большинстве случаев целесообразно выбирать алгоритм Левенберга-Марквардта, и только при значительном увеличении числа связей ИНС может быть рекомендовано использование метода сопряженных градиентов [4]. Оба алгоритма являются локальными и ведут к одному из локальных минимумов целевой функции, лежащему в окрестности точки начала обучения. Если локальное решение признается неудовлетворительным, следует, по крайней мере, еще один раз повторить процесс обучения при других начальных значениях весов и с другими управляющими параметрами.

Алгоритмически построение нейросетевого устройства может быть представлено блок-схемой, приведенной на рис. 4. В случае, когда погрешность функционирования сети на тестовой выборке  $G$  не превосходит заданную ошибку  $\delta$ , сеть считается окончательно обученной, а параметры и структура нейросетевого устройства – определенными.

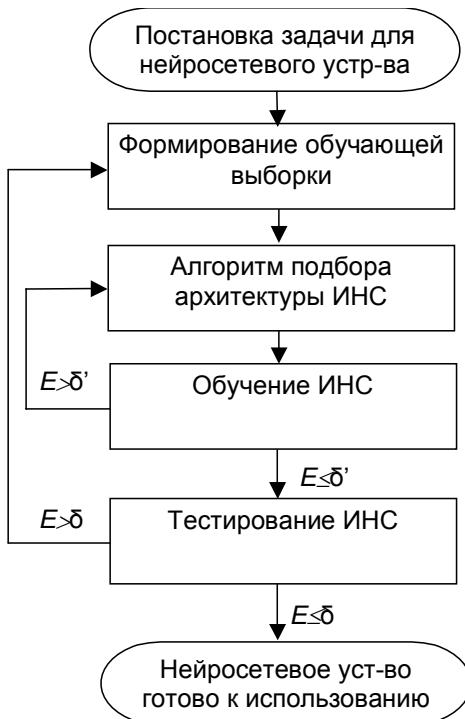


Рис. 4. Упрощенная структурная схема алгоритма синтеза нейросетевой модели

## Выводы

Использование предложенной методики синтеза архитектуры позволяет решить задачу построения моделей сложных динамических систем в различных предметных областях: в технике, экономике, биологии, медицине. Предлагаемый подход использовался при моделировании системы управления автоматизированного электропривода: для построения нейросетевого предсказывающего фильтра и наблюдателя магнитного потока. Преимущества такого подхода заключаются в том, что формируется оптимальная структура нейронной сети, адаптированная к конкретной задаче.

## Литература

1. Лукичев Д.В. Выбор оптимальной структуры нейросетевого предсказывающего фильтра. // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 11. С. 38–42.
2. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. / 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия – Телеком, 2002. 382 с.: ил.
3. Нейроматематика. Кн. 6: Учебное пособие для вузов / Общ. ред. А.И. Галушкина. М.: ИПРЖР, 2002. 425 с.: ил.
4. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации / Пер. с польского И.Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2002. 344 с.: ил.
5. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы: пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия – Телеком, 2004. 452 с.: ил.

# БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИЙ ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ. ПРИНЦИП ПРОЕКТИРОВАНИЯ

И.Е. Овчинников, Д.С. Анахин

В статье рассматриваются некоторые аспекты проектирования быстродействующих вентильных двигателей, даются результаты моделирования конкретного образца.

Вентильные двигатели (ВД) находят все более широкое применение в различных областях современной техники благодаря своей надежности, обусловленной отсутствием скользящих электрических контактов и хорошим регулировочным характеристикам, не уступающим характеристикам традиционных коллекторных машин постоянного тока [1].

Многими зарубежными и российскими фирмами созданы серии таких двигателей, предназначенные для привода подач металлорежущих станков, систем робототехники, автоматических технологических линий и других применений. Между тем, создание двигателей повышенного быстродействия все еще остается актуальным и имеет свою специфику.

В практике проектирования ВД обычно используется привязка стандартного ряда длительных моментов  $M_{d0}$  к диаметру окружностей центров отверстий крепежного фланца, именуемого условно «диаметром фланца». Приблизительный характер привязки момента  $M_{d0}$  к «диаметру фланца»  $D_f$  для двигателей с редкоземельными (РЗ) постоянными магнитами на роторе показан в табл. 1.

Таблица 1

$D_f$ (мм)	63 75	100	115 130	165	215
$M_{d0}$	0,5	1,7	3,2	13,0	35,0
$N^*m$	1,0	2,4	7,0	17,0	47,0
	1,5	3,1	10,0	23,0	70,0

Улучшение динамических характеристик управляемого ВД возможно, главным образом, за счет уменьшения механической постоянной времени  $T_m = (J\Omega_0)/M_{\pi}$ , где  $J$  – момент инерции ротора ( $\text{кгм}^2$ ),  $\Omega_0$  – скорость идеального холостого хода (1/с),  $M_{\pi}$  – пусковой момент ( $\text{Н}^*\text{м}$ ). Ясно, что при заданной максимальной скорости  $\Omega_{\max}$  (а, следовательно, и скорости  $\Omega_0 \approx 1,2-1,4\Omega_{\max}$ ) и ограниченных возможностях по увеличению пускового момента  $M_{\pi}$  единственным рациональным средством является уменьшение момента инерции ротора  $J$ . Это означает, во-первых, применение в роторе высокоэнергетических и достаточно дорогих РЗ магнитов, обеспечивающих максимальный поток возбуждения при минимальной массе магнитов, а во-вторых, необходимость уменьшения диаметра ротора при сохранении, как будет показано далее, его объема. Последнее условие предопределяет и особенность конструкции быстродействующих двигателей – это длинные машины с большим отношением активной длины ротора  $l_a$  к его диаметру  $D_r$ :

$$\varepsilon_{\max} = \frac{l_a}{D_r}.$$

Учитывая сказанное, можно заметить, что создание быстродействующих двигателей должно предполагать смещение шкалы моментов в табл. 1 в сторону меньших диаметров фланца, а, значит, и меньших диаметров роторов.

Практика проектирования ВД выработала привязку не только ряда моментов к диаметру фланца, но и привязку размеров поперечной геометрии двигателя к данному диаметру фланца. Эта привязка, конечно, не является абсолютно четкой, однако дает хороший ориентир при выборе соответствующих размеров. Пример привязки диаметра ротора  $D_r$  и наружного диаметра пакета статора  $D_a$  к диаметру фланца  $D_f$  приведен в табл. 2.

Таблица 2

Диаметр фланца	$D_f$ , мм	63	75	100	115	130	165	215
Диаметр пакета	$D_a$ , мм	48	62	80	97	110	130	172
Диаметр ротора	$D_r$ , мм	26	33	43	52	60	70	93

При проектировании ВД повышенного быстродействия, учитывая сказанное, необходимо по заданному длительному моменту двигателя  $M_{d0}$  выбрать диаметр фланца  $D_f$  из табл. 1, смещая  $D_f$  на один столбец влево. Например, если задан  $M_{d0} = 1,7 \text{ Н*м}$ , то из табл. 1 следует выбрать  $D_f = 75 \text{ мм}$ , а не  $D_f = 100 \text{ мм}$ , как это было бы для ВД «нормального» быстродействия. Далее для выбранного диаметра фланца  $D_f$  из табл. 2 следует выбрать диаметр ротора  $D_r$  и диаметр пакета  $D_a$ . На этом заканчивается первый этап проектирования.

На втором этапе следует определить объем магнитов ротора, который был бы устойчив против размагничивающего действия потоков реакции якоря при любых переходных режимах, в том числе при авариях. Минимально допустимый объем магнитов по условиям устойчивости против размагничивающего действия реакций якоря определяется по формуле

$$V_m = \frac{M_{\max} \cdot (\sigma + k_{\mu} \cdot \frac{\mu_r}{\mu_0} \cdot \frac{L_{\delta}}{L_m} \cdot \frac{Q_m}{Q_{\delta}})}{\frac{3}{\pi} \cdot p \cdot k_{01} \cdot B_r \cdot H_c \cdot h_{p\alpha}}. \quad (1)$$

Здесь  $M_{\max}$  – максимальный момент двигателя, отвечающий максимальному току реакции якоря. Обычно  $M_{\max} \approx (4-6) M_{d0}$ ;  $B_r$ ,  $H_c$  – остаточная индукция (Т) и коэрцитивная сила магнита (А/м) с линейным участком кривой размагничивания;  $\mu_r = B_r/H_c$  – внутренняя проницаемость магнита, Г/м;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  – проницаемость вакуума, Г/м;  $k_{\mu}$  – коэффициент насыщения магнитной цепи, принимаемый на исходном этапе 1,1–1,15;  $\sigma$  – коэффициент рассеивания потока, принимаемый на уровне 1,1–1,2;  $L_{\delta} = 2\delta k_s$  – эквивалентная длина двух зазоров  $\delta$  с учетом коэффициента Картера  $k_s \approx 1,3-1,35$ ;  $L_m$  – средняя длина магнитов на пару полюсов;  $Q_{\delta}$ ,  $Q_m$  – площадь зазора и площадь поперечного сечения магнита, через которую проходит поток на пару полюсов (в формуле (1) принимается  $Q_m/Q_{\delta} \approx 0.8-0.9$ ;  $L_{\delta}/L_m \approx 0.05-0.07$ );  $p$  – число пар полюсов ротора, выбираемые для нашего случая  $p=3$  или  $p=4$ ;  $k_{01}$  – обмоточный коэффициент фазы ( $k_{01} \approx 0.91-0.95$ );  $h_{p\alpha}$  – относительная величина, характеризующая реакцию якоря и вычисляемая по формуле

$$h_{p\alpha} = \frac{F_{p\alpha}}{H_c \cdot L_m},$$

где  $F_{p\alpha} = k I_a w_a$  – магнитодвижущая сила (МДС) реакции якоря,  $I_a$  – ток обмотки,  $w_a$  – число витков обмотки. Как правило, можно принять  $h_{p\alpha} = (0.6-0.8) \sigma$ .

Определив объем магнита  $V_m$ , можно найти относительную длину ротора:

$$\varepsilon = \frac{l_a}{D_r}.$$

Для магнитов дугообразной формы или в форме плашек, чаще всего применяемых для РЗ материалов, находим:

$$\varepsilon'_{\min} = \frac{2 \cdot V_m}{\pi \cdot D_r^3 \cdot \zeta_n \cdot (1 - \zeta_n)} , \quad (2)$$

где  $\zeta_n$  – коэффициент полюсной дуги,  $\zeta_n = \frac{b_n}{\tau}$ ,  $b_n$  – длина дуги магнита по окружности ротора,  $\tau$  – полюсное деление. Для числа зубцов  $z = 36$   $\zeta_n \approx 0,7$  или  $\zeta_n = 0,833$ ; для  $z = 27$   $\zeta_n \approx 0,728$ .

Далее, зная  $D_r$ ,  $p$ ,  $\zeta_n$ , можно определить все геометрические размеры ротора (рис.1) и размеры плашек магнитов, образующих полюсную систему.

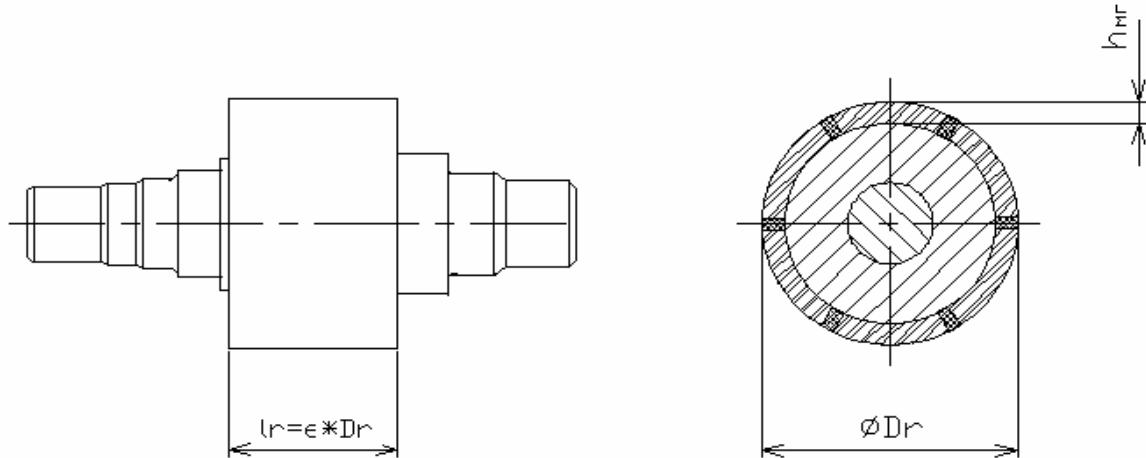


Рис.1. Ротор вентильного двигателя:  $lr$  – длина ротора,  $Dr$  – диаметр ротора,  $h_mg$  – высота плашки магнита

Найденный объем магнита, а также основные геометрические размеры ( $D_r$ ,  $l_r = \varepsilon_{\min} D_r$ ), определяющие габариты двигателя, не гарантируют выполнения еще одного важного условия – рабочей температуры элементов конструкции (корпус, обмотка, магниты), не выходящей за пределы допустимых норм. Проверка выполнения этого условия составляет содержание третьего этапа проектирования.

ВД рассматриваемого применения предполагает только естественное охлаждение путем теплоотдачи выделяемого тепла с поверхности корпуса. Тепловой баланс двигателя определяется уравнением

$$P_t = \alpha_0 \cdot S_{\Sigma} \cdot \Delta t_k^0 . \quad (3)$$

Здесь  $P_t$  – мощность тепловых потерь, выделяемых в двигателе, Вт;  $S_{\Sigma}$  – суммарная поверхность охлаждения,  $\text{м}^2$ ;  $\Delta t_k$  – превышение температуры корпуса над температурой окружающей среды,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\alpha_0$  – коэффициент теплоотдачи с поверхности двигателя,  $\text{Вт}/^{\circ}\text{С} \cdot \text{м}^2$ . В практике проектирования ВД принята эмпирическая зависимость  $\alpha_0 \approx 0,067 \Delta t_k + 9$ . Обычно для класса изоляции  $F$  принимается  $\Delta t_k \approx 80-85^{\circ}\text{C}$ .

В качестве потерь  $P_t$  в (3) учитываются только потери в меди, поскольку рассматривается наиболее тяжелый режим работы двигателя вблизи нуля скорости, когда остальные потери (в стали, на трение и др.) пренебрежимо малы.

Расшифровка левой части уравнения (3) позволяет свести ее к функции

$$P_t = P_0 \cdot \left( \frac{\varepsilon + \bar{l}_1}{\varepsilon^2} \right) , \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – относительная длина ротора,  $\bar{l}_1$  – относительная (безразмерная) длина, зависящая от длины витка обмотки, отнесенной к диаметру ротора,  $P_0$  – некоторая величина,

имеющая размерность мощности и зависящая от величины момента  $M_{d0}$ , параметров магнита и геометрических размеров.

Анализ формулы показывает, что мощность потерь  $P_t$  уменьшается с увеличением относительной длины ротора  $\varepsilon$ . Это имеет простое физическое объяснение: с ростом  $\varepsilon$  увеличивается поток двигателя, а, значит, уменьшается необходимое число витков обмотки для создания заданного момента  $M_{d0}$ :  $M_{d0} = C_m p \Phi w I$  (ток  $I$  практически значительно изменен быть не может, так как он определяется мощностью двигателя  $P_{\text{дв}} = M'_{d0} \Omega_{\text{max}}$ ,  $M'_{d0}$  обычно несколько меньше  $M_{d0}$  с учетом потерь, возникающих при скоростях, больших  $0,25 \Omega_{\text{max}}$ ). Уменьшение числа витков приводит к возрастанию площади сечения каждого проводника в предположении постоянства коэффициента заполнения паза медью. Таким образом, увеличение  $\varepsilon$  (увеличение потока  $\Phi$ ) приводит к уменьшению требуемого числа витков  $w$ , увеличению их сечения и уменьшению суммарного активного сопротивления обмотки  $R_0$ . Последнее приводит к уменьшению тепловых потерь

$$P_t = k \cdot I^2 \cdot R_0,$$

где  $k=1.1-1.15$  – коэффициент пульсационных потерь, учитывающих «негладкость» кривой тока двигателя.

Расшифровка правой части уравнения (3) также приводит к функции, зависящей от относительной длины  $\varepsilon$ , поскольку площадь поверхности охлаждения зависит от длины корпуса  $l_k$ , а, значит, и от параметра  $\varepsilon$ . Таким образом, удается получить мощность потерь, рассеиваемых с поверхности корпуса, в виде

$$P_\alpha = \alpha \Delta t_k [k_1(\varepsilon + B_1) + B_0]. \quad (5)$$

Приравнивая (4) и (5), получаем уравнение теплового баланса

$$P_0 \left( \frac{\varepsilon + \bar{l}_1}{\varepsilon^2} \right) = \alpha \Delta t_k [k_1(\varepsilon + B_1) + B_0], \quad (6)$$

которое следует разрешить относительно  $\varepsilon$ . Полученное решение и определит ту относительную длину ротора или равную ей относительную длину пакета статора, которая обеспечит допустимый перегрев  $\Delta t_k$ , заданный нами в зависимости от класса изоляции двигателя (обычно  $F$ ). Заметим, что величины  $k_1$ ,  $B_1$ ,  $B_0$  зависят от известных или вычисленных ранее геометрических размеров корпуса и его ребер.

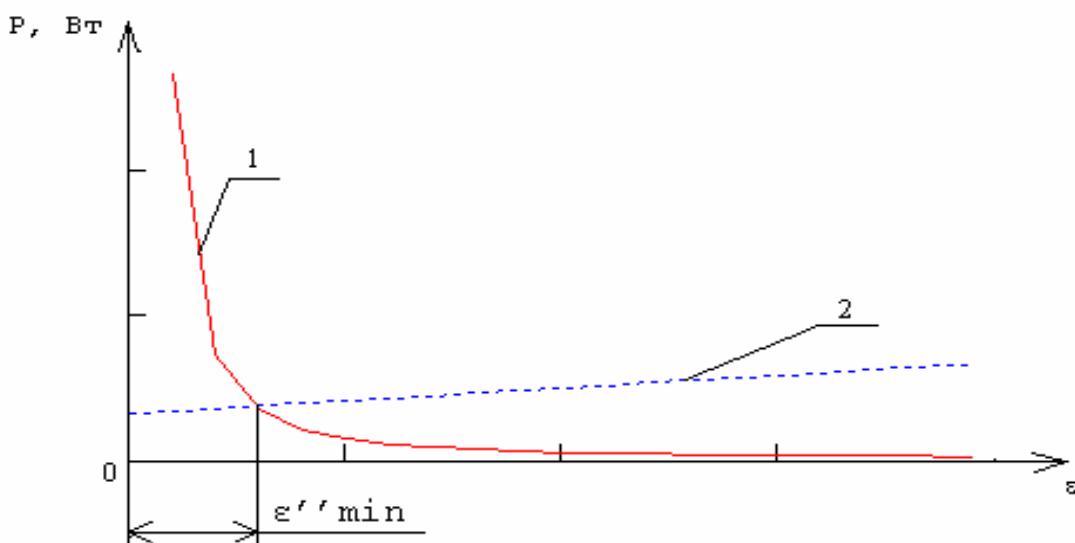


Рис. 2. Кривая потерь (1) и кривая рассеиваемой мощности (2)

Кривая 1 на рис. 2 показывает изменение потерь  $P_t$  в зависимости от  $\epsilon$ , а кривая 2 – изменение мощности  $P_\alpha$ , рассеиваемой с поверхности путем теплоотдачи (правая часть уравнения (6)). Пересечение кривых 1 и 2 определит требуемый минимальный параметр  $\epsilon''_{\min}$ , обеспечивающий отсутствие перегрева двигателя. Сравнивая полученное значение с ранее определенным параметром  $\epsilon'_{\min}$ , следует выбрать наибольшее из этих значений. Такой выбор одновременно удовлетворит двум условиям: устойчивость магнита против размагничивания током реакции якоря и обеспечение допустимого перегрева элементов конструкции двигателя.

После выбора параметра относительной длины  $\epsilon$  можем определить следующее расчетные величины: поток в зазоре на пару полюсов

$$\Phi_\delta = \frac{B_r \cdot Q_m}{\sigma + k_\mu \cdot \frac{\mu_r}{\mu_0} \cdot \frac{\delta_\vartheta}{(h_{mg})_{cp}} \cdot \frac{Q_m}{Q_\delta}} ; \quad (7)$$

$\delta_\vartheta = k_\delta \delta$  – эквивалентный воздушный зазор под полюсом; площадь сечения магнита  $Q_m = \frac{\pi}{2p} \zeta_n \epsilon D_r^2$ ; длительный номинальный ток двигателя, соответствующий заданному моменту  $M_{d0}$ ,

$$I_{H_{cp}} = \frac{M_{d0}}{C_m \cdot p \cdot k_{01} \cdot \Phi_\delta \cdot w_1}.$$

В последней формуле  $C_m = 3\sqrt{3}/\pi$  – конструкционный коэффициент, а  $w_1$  – число витков фазы, определяемое выражением

$$w_1 = \frac{(U_d)_{\min} \cdot \omega_{\max}}{C_m \cdot k_{01} \cdot p \cdot \Phi_\delta \cdot Q_{\max}},$$

где  $(U_d)_{\min}$  – минимальное напряжение постоянного тока, подводимое непосредственное к обмотке двигателя на межкоммутационном периоде  $\nu_k = \pi/3$ ,  $\omega_{\max} = \Omega_{\max}/\Omega_0$ ,  $\Omega_0$  – скорость идеального холостого хода. В диапазоне моментов  $M_{d0} = 1,0–13,0$  Нм можно принять  $\omega_{\max} = 0,75–0,83$ .

Далее следует выбрать сечение и диаметр провода, которые при найденном ранее числе витков обмотки  $w_z = 3w_1$  могут быть размещены в пазах статора при коэффициенте заполнения по меди в пределах не более  $k_3 = 0,35–0,4$ .

Четвертый этап предполагает уточненный расчет магнитной цепи машины с учетом ее насыщения и рассеивания потока. В результате расчета уточняется величина рабочего потока двигателя и, в случае необходимости, проводится корректировка обмоточных данных. Результаты расчета представлены в виде графиков на рис. 3. На этом рисунке  $\Phi_m = f(F_m)$  – кривая размагничивания магнита (для РЗ магнитов – прямая линия) в координатах «поток  $\Phi_m$  – МДС  $F$ ».  $\Phi_\delta$  – полезный поток в зазоре, сцепленный с обмоткой,  $\Phi_b$  – поток рассеивания магнита.  $\Phi_\Sigma = \Phi_\delta + \Phi_b$  – суммарный поток с учетом рассеивания. Пересечение кривых  $\Phi_m = f_1(F)$  и  $\Phi_\Sigma = f_2(F)$  дает рабочую точку  $A_0$ , характеризующую поток на пару полюсов в нейтральном сечении магнита. Отрезок  $A_0A_1$  характеризует полезный поток  $\Phi_\delta$  в зазоре машины.

Если уточненная величина  $\Phi_\delta$  будет отличаться более чем на 5–8% от расчетной величины потока  $\Phi_\delta$ , определенной ранее по формуле (7), то следует провести корректировку обмоточных данных с тем, чтобы выдержать соотношение

$$(\Phi_\delta w_1)_{\text{ст}} = (\Phi_\delta w_1)_{\text{нов}},$$

где  $(\Phi_\delta w_1)_{\text{ст}}$  – расчетный поток и число витков фазы по старым данным,  $(\Phi_\delta w_1)_{\text{нов}}$  – уточненный поток и новое значение числа витков, соответственно.

На пятом этапе проводится уточненный расчет потерь двигателя, строятся, в случае необходимости, зоны работы в режимах  $S1, S2, S3$ .

На шестом этапе проводится расчет масс, моментов инерции и габаритов двигателя, определяются механические и электромагнитные постоянные времени.

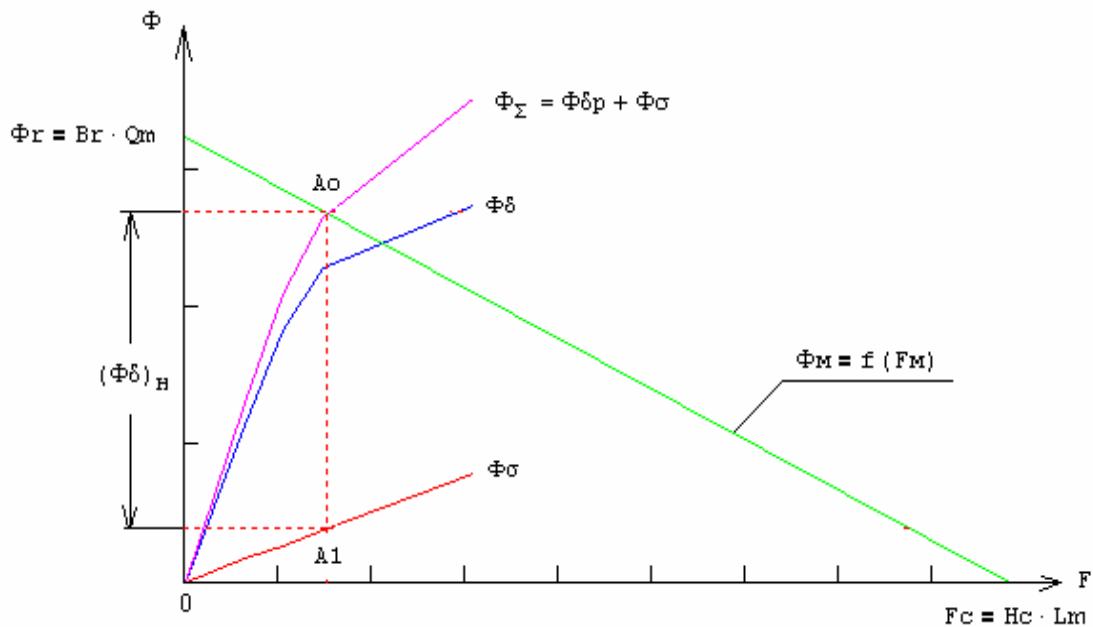


Рис. 3. Определение рабочей точки с учетом насыщения магнитной цепи двигателя

На заключительном, седьмом этапе проводится построение механической характеристики двигателя. Механическая характеристика вентильного двигателя строятся на основе следующих безразмерных зависимостей момента и угла коммутации (эл. град.)

$$\mu = \frac{1}{\bar{r}} \phi (\bar{u} - \phi \omega) \left( 1 - \frac{\bar{u} + \phi \omega \gamma}{\bar{u} - \phi \omega \pi} \right), \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{1}{\bar{r}} x_0 \omega \ln \left( 1 + \frac{3}{2} \left( \frac{\bar{u} - \phi \omega}{\bar{u} + \phi \omega} \frac{1 - e^{\frac{-\pi \bar{r}}{3x_0 \omega}}}{1 - \frac{1}{2} e^{\frac{-\pi \bar{r}}{3x_0 \omega}}} \right) \right).$$

Здесь  $\mu$  – относительный момент, вычисляемый по формуле

$$\mu = \frac{M}{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} \cdot p \cdot k_{01} \cdot \Phi_{\delta H} \cdot w_1 \cdot I_n} = \frac{M}{(M_n)_H},$$

где  $(M_n)_H$  – номинальный пусковой момент при нормальной температуре,  $\Phi_{\delta H}$  – номинальный поток в зазоре при нормальной температуре,  $\phi = \Phi / \Phi_{\delta H}$  – относительный поток ( $\phi \approx 1 - 0,00045 * (t_{Mg} - 20)$  – для материала SmCo  $\phi \approx 1 - 0,00089 * (t_{Mg} - 20)$  – для материала NdFeB).

При расчете характеристик по формулам (8) используются следующие безразмерные величины:  $\omega = \Omega / (\Omega_{0H})$  – относительная скорость,  $\bar{u} = U / U_H$  – относительное напряжение,  $\bar{r} = R_{1t} / R_{129}$  – относительное активное сопротивление фазы при температуре  $t$ , отличной от нормальной температуры ( $20^{\circ}\text{C}$ ),  $X_0$  – относительное индуктивное сопротивление фазы. При этом

$$(\Omega_0)_H = \frac{U_H}{\frac{3\sqrt{3}}{\pi} p k_{01} \Phi_{\delta_H} w_l}$$

– скорость идеального холостого хода при номинальном напряжении  $U_H$  и нормальной температуре,

$$x_0 = \frac{3}{2} \cdot \frac{L_1 p (\Omega_0)_H}{R_{I_H}}.$$

На основании выражений (8) строятся механические характеристики, отвечающие следующим условиям:

1. номинальное напряжение и нормальная температура двигателя («холодный» двигатель),  $\bar{u} = 1$ ,  $\bar{r} = 1$ ,  $\varphi = 1$ ;
2. номинальное напряжение и максимально допустимая температура двигателя («горячий» двигатель, температура обмотки  $t_{\text{обм}} = 140^\circ\text{C}$ , температура магнитов  $t_{\text{маг}} = 110\text{--}120^\circ\text{C}$ ),  $\bar{u} = 1$ ,  $\bar{r} \approx 1.48$ ,  $\varphi \approx 0.92$ ;
3. пониженное напряжение (определяется заданием), максимально допустимая температура двигателя,  $\bar{u} < 1$ ,  $\bar{r} \approx 1.48$ ,  $\varphi \approx 0.92$ .

На рис. 4 показаны механические характеристики, построенные по формулам (8), для рассмотренных трех случаев состояния двигателя.

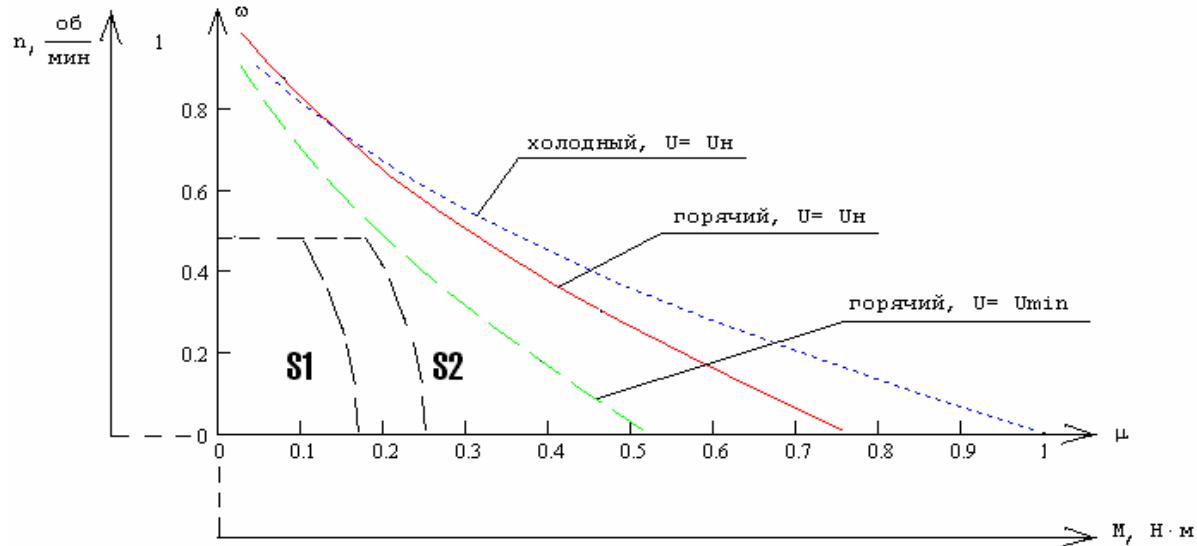


Рис. 4. Механические характеристики двигателя

В результате построения характеристик следует убедиться, что, по крайней мере, кривая режима продолжительной работы S1 лежит внутри области, ограниченной механической характеристикой для наиболее тяжелых условий:  $U = U_{\min}$  и  $t = t_{\max}$ .

Изложенный в статье подход был использован при проектировании быстродействующего ВД с длительным моментом  $M_{d0} = 1.7$  Нм, допускающего максимальную рабочую скорость  $n_{\max} = 4000$  об/мин.

В двигателе с числом фаз  $m=3$  и числом  $2p = 6$  были использованы редкоземельные постоянные магниты из материала NdFeB. Результаты проектирования в виде основных параметров двигателя и их сравнение с параметрами зарубежных аналогов представлены в табл. 3. Из приведенной таблицы можно видеть, что спроектированный двигатель по таким показателям, как удельный момент (момент на единицу массы) и момент инерции, превосходит зарубежные образцы. В значительной степени это объясняется тем, что изначально при проектировании двигателя был использован подход, обеспечива-

вающий уменьшение габарита по диаметру за счет увеличения осевого размера, а также увеличения соответствующих электромагнитных нагрузок.

Таблица 3

Параметр	Ед., изм.	Разработка	Bosch, Германия, SE-B	Siemens, Германия, 1FT5	Baumuller, Германия, DS	Indramat, Германия, MAC-63
Длительный момент, $M_{d0}$	Нм	1,7	2,0	2,0	1,7	1,5
Диаметр фланца, $D_f$	мм	75	115	115	115	115
Сторона квадрата фланца, $a_{kv}$	мм	70	100	105	105	100
Момент инерции ротора, $J_p$	Кгм <sup>2</sup>	$10^{-4}$	$4,3 \times 10^{-4}$	$4,5 \times 10^{-4}$	$2,1 \times 10^{-4}$	$3,2 \times 10^{-4}$
Максимальная скорость, $n_{max}$	об/мин	4000	4000–5000	6000	6000	6000
Масса, $G_{дв}$	кг	3,3	6,5	6,4	5,9	3,9
Удельный момент на единицу массы, $m_{уд}$	Нм/кг	0,51	0,31	0,31	0,29	0,39

Принципиальная конструкционная схема двигателя показана на рис. 5.

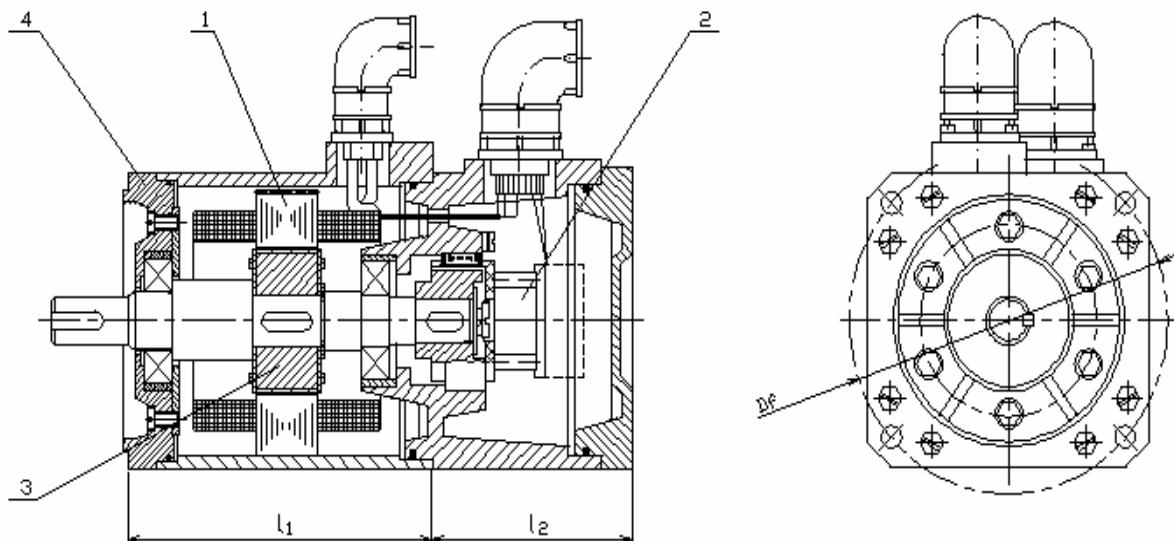


Рис. 5. Принципиальная конструкционная схема двигателя: 1 – статор с обмоткой, 2 – тахогенератор и датчик положения ротора, 3 – ротор с постоянными магнитами, 4 – передний подшипниковый щит

### Литература

1. Адволоткин Н.П., Овчинников И.Е. Вентильные двигатели с постоянными магнитами (электромеханическая часть). / Серия 01 «Электрические машины». М.: Информэлектро, 1986.
2. Овчинников И.Е., Лебедев Н.И. Бесконтактные двигатели постоянного тока. Л.: Наука, 1979.
3. Овчинников И.Е. Теория вентильных двигателей. Л.: Наука, 1985.

# ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДСИСТЕМА ЦИФРОВОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

В.И. Евлентьев, И.Н. Жданов

Исследуется электропривод с шумами в цепях обратных связей; для устранения шумов предлагается использовать цифровую фильтрацию сигналов. Для оценки ошибки цифровой фильтрации разработана математическая модель электропривода с цифровыми фильтрами в цепях обратных связей по току и скорости.

## Введение

Последнее время в системах управления и контроля электротехнических комплексов и систем все большие функции по вычислению сигналов управления и обработке сигналов обратных связей, поступающих с датчиков, возлагаются на микропроцессор. Это связано с появлением быстродействующих многофункциональных микроконтроллеров, отвечающих предъявляемым к системе управления динамическим и точностным требованиям. При управлении различными объектами возникает ряд проблем, связанных с появлением шумов в цепях обратных связей, например, шум в цепи обратной связи по скорости, наводимый тахогенератором. Для большей унификации систем функции фильтрации сигналов все чаще выполняются с помощью цифровых фильтров, реализованных на микропроцессоре.

Однако при реализации цифровых фильтров необходимо учитывать ошибки фильтрации, возникающие вследствие конечной разрядности вычислительного устройства. К таким ошибкам относятся квантование входных сигналов, квантование коэффициентов фильтра и конечная разрядность операционных устройств, приводящая к округлению результатов арифметических операций. Аналитически оценить появляющиеся ошибки, как правило, невозможно. Существующие методы оценки возникающих погрешностей довольно сложны и базируются на предположении статистической независимости входного сигнала и отдельных источников шума внутри фильтра, на практике же подобные допущения часто нарушаются, что делает эти оценки весьма условными [2].

Для оценки величины ошибки, возникающей в реальных дискретных системах, целесообразно проведение моделирования алгоритма цифрового фильтра, реализованного на микропроцессоре с сохранением той же последовательности и разрядности вычислений [1].

Учитывая методы представления чисел в вычислительном устройстве, способы квантования, особенности структурной схемы фильтра, в каждом конкретном случае можно оценить, как перечисленные источники ошибок скажутся на характеристиках фильтра. Структура цифрового фильтра, разрядность входных и выходных сигналов и арифметических устройств, период дискретизации сигналов должны выбираться таким образом, чтобы результирующая ошибка фильтра не превышала допустимой величины, и выполнялись требования к быстродействию фильтра.

## Цифровая фильтрация сигналов

При реализации цифровых фильтров для условного изображения алгоритмов дискретных фильтров используются различные структурные схемы. Наиболее часто используются структурные схемы в виде прямой и прямой канонической форм представления [3, 5]. Наиболее известными и часто используемыми видами аппроксимации характеристик фильтра являются аппроксимация Баттервортса; Чебышева и Бесселя.

При реализации фильтров различного порядка с разными структурными схемами в зависимости от разрядности арифметического устройства появляется некоторая ошибка. Для оценки этой ошибки была разработана математическая модель цифрового

фильтра, реализованного на микропроцессоре с сохранением той же последовательности и разрядности операций. Модель позволяет наблюдать выходной сигнал фильтра при любом входном воздействии. В результате моделирования можно сделать оценку погрешности цифрового фильтра в зависимости от его формы представления, разрядности и периода дискретизации.

Разработанная модель позволила оценить величину установившейся ошибки; например, при постоянном входном сигнале и 16-разрядном вычислительном устройстве для фильтра Баттервортса второго порядка она составила 2.895%, а при 32 разрядах для того же фильтра – 0.002%.

При подаче на вход постоянного сигнала с амплитудой 0,6 выходной сигнал фильтра будет иметь вид, представленный на рис. 1. Аналогично для фильтра верхних частот с частотой среза 50 Гц при подаче на вход синусоидального сигнала с частотой 1кГц будут получены графики, представленные на рис. 2.

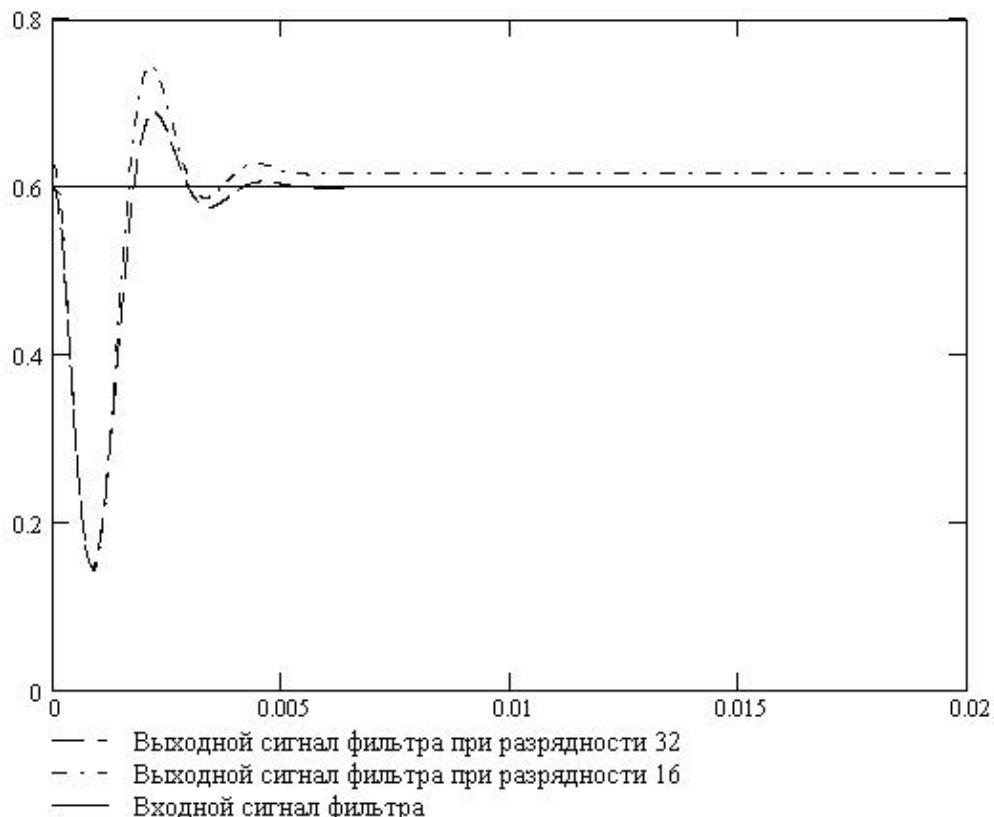


Рис.1. Выходной сигнал 16-ти и 32-х разрядного фильтра НЧ при неизменном сигнале задания

### Цифровые фильтры в системе электропривода

Для оценки влияния ошибки цифровой фильтрации сигналов на характеристики замкнутой системы электропривода постоянного тока была разработана математическая модель этой системы с введением фильтра в цепи обратных связей по току и скорости. Структурная схема электропривода представлена на рис. 3.

Переходные процессы в цепях обратной связи по току и скорости при появлении шума представлены на рис. 4. При моделировании с введением рассчитанных для этой системы цифровых фильтров нижних частот в цепь обратных связей графики приобретают вид, представленный на рис. 5.

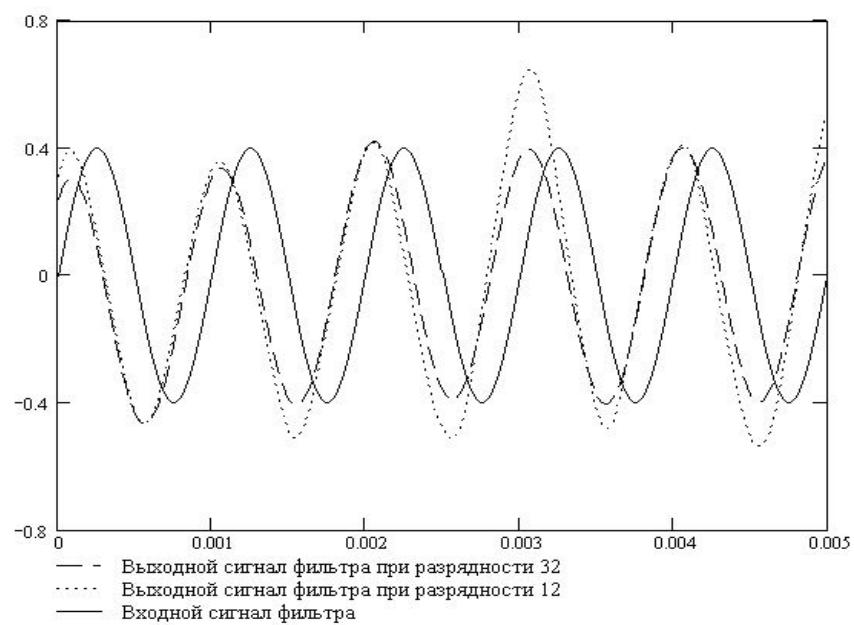


Рис. 2. Выходной сигнал 12-ти и 32-х разрядного фильтра ВЧ при синусоидальном сигнале задания

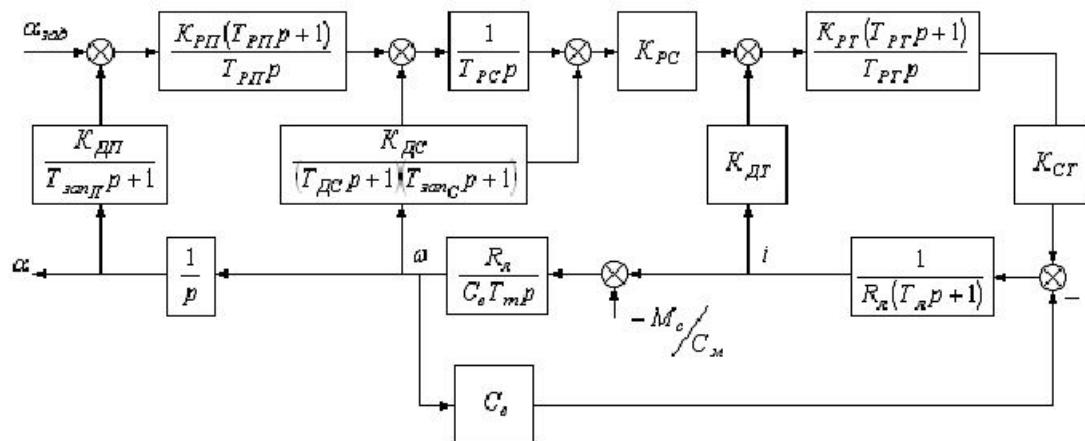


Рис. 3. Структурная схема электропривода

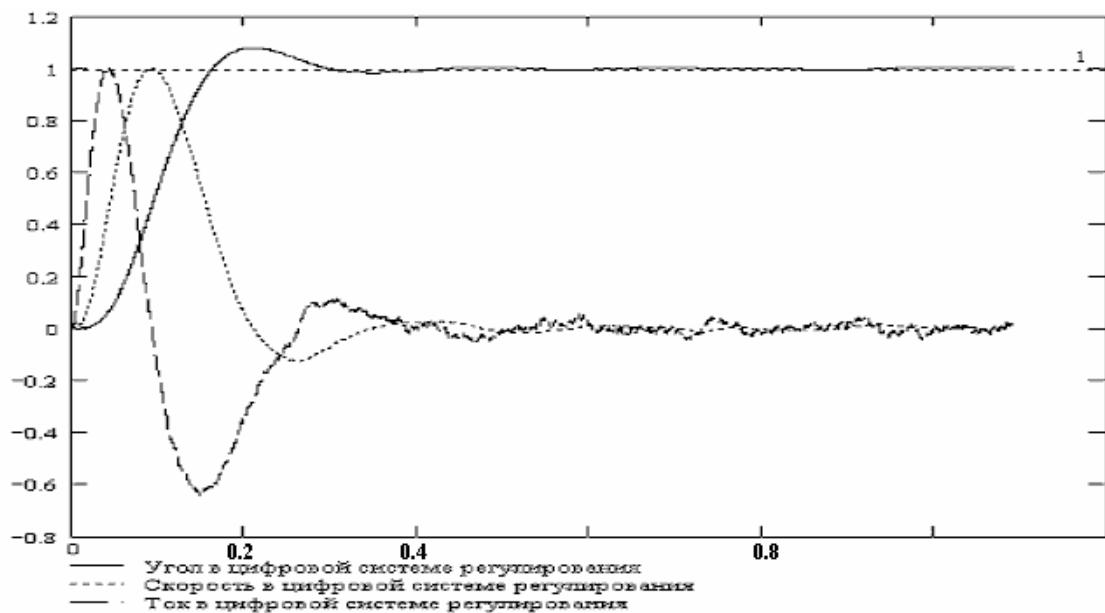


Рис. 4. Переходные процессы в электроприводе с шумом в цепи ОС

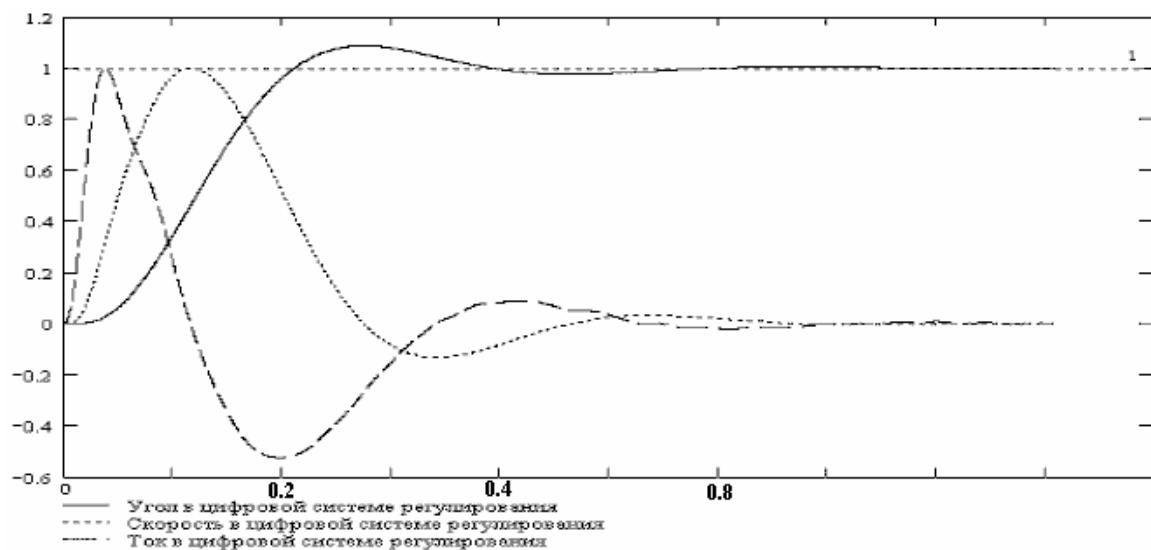


Рис. 5. Переходные процессы в электроприводе с фильтрацией шумов в цепях обратных связей по току и скорости

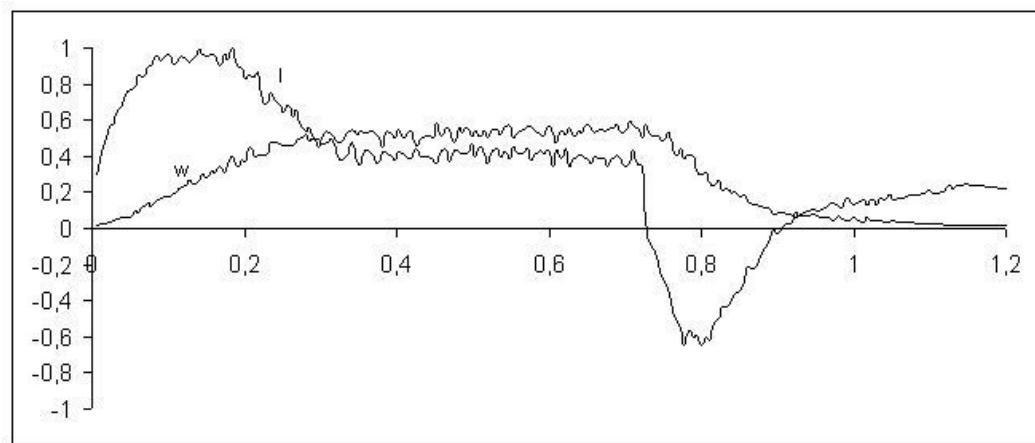


Рис. 6. Переходные процессы в замкнутой по скорости системе без фильтрации сигналов в цепях ОС.

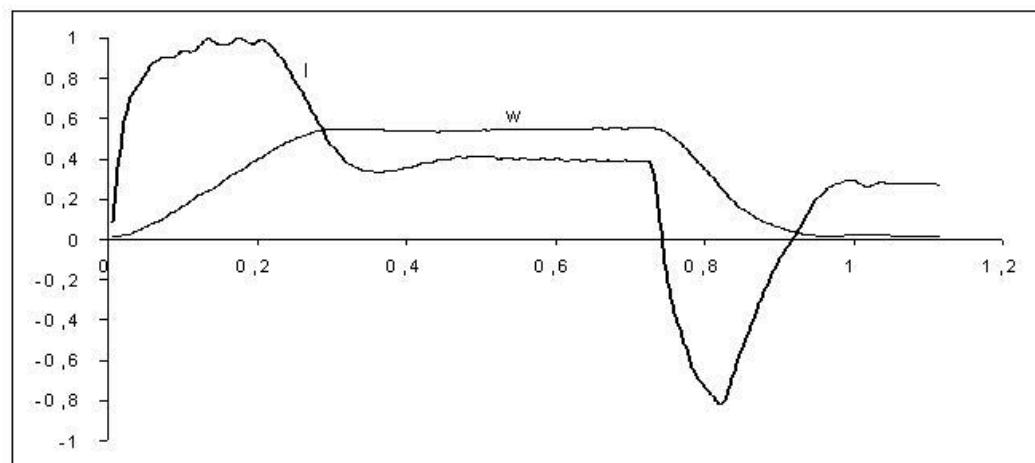


Рис. 7. Переходные процессы в замкнутой по скорости системе с фильтрацией сигналов в цепях ОС.

Проверка полученных результатов производилась на лабораторном стенде «Исследование цифровых систем электропривода постоянного тока с широтно-импульсными транзисторными преобразователями», в качестве нагрузочной и испытательной.

туемой машин использовались двигатели ДРВ 20Д, тахогенератор на базе машины постоянного тока типа ДПМ – 35Н1-04.

Переходные процессы в замкнутой по скорости системе без фильтрации сигналов представлены на рис. 6, а при цифровой фильтрации сигналов в цепях обратной связи по току и скорости – на рис.7.

## Заключение

В рамках проделанной работы был создан математический пакет, позволяющий рассчитать коэффициенты цифровых фильтров любого типа и различных порядков, была разработана математическая модель алгоритма функционирования цифрового фильтра, позволяющая выявить ошибки, присущие реальным системам, но практически не рассчитываемые аналитически.

По результатам моделирования разработанной модели фильтра можно правильно выбрать вычислительное устройство или микропроцессор определенной разрядности для реализации цифрового фильтра, удовлетворяющего заданным требованиям к быстродействию. Для этого нужно выбрать структуру фильтра, разрядность входных и выходных сигналов и арифметических устройств, а также период дискретизации сигналов.

Практические результаты подтвердили соответствие разработанной математической модели реальной системе.

Применение фильтров позволяет значительно повысить точность и устойчивость системы.

## Литература

1. Денисов К.М., Жданов И.Н. Алгоритмическое моделирование цифрового фильтра. // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Выпуск 10. Информация и управление в технических системах. СПб.: СПбГИТМО(ТУ), 2003.
2. Жданов И.Н., Евлентьев В.И. Оценка эффектов влияния конечной разрядности чисел в цифровых фильтрах. / 5-я международная конференция «Электромеханика, электротехнологии и электроматериаловедение». Часть 1. Крым, Алушта, 2003.
3. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984.
4. Ковчин С.А., Сабинин Ю.А. Теория электропривода. СПб: Энергоатомиздат, 1994.
5. Рабинер Р., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1978.

# СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ АЗИМУТАЛЬНОЙ ОСИ ТЕЛЕСКОПА С ФАЗЗИ-РЕГУЛЯТОРОМ

К.М. Денисов, Д.В. Куприянчик

Статья посвящена описанию разработки аппаратного фаззи-регулятора для работы в контуре скорости цифровой системы управления электроприводом азимутальной оси телескопа.

К приводам телескопов предъявляются высокие и однотипные технологические требования по статическим и динамическим характеристикам. Они должны обеспечивать низкую статическую ошибку выведения (менее  $1''$ ) при отсутствии перерегулирования в контуре положения, среднеквадратичная ошибка программного наведения при малой скорости слежения ( $10''/с$ ) должна быть не более  $1''$ , а для большой скорости слежения ( $1''/с$ ) – соответственно  $1''$ .

Рассматриваемая система управления (рис. 1) содержит контур регулирования угла и подчиненные контура регулирования скорости и тока. Синтез параметров регуляторов системы производится из условия обеспечения в системе оптимума по модулю с временем переходного процесса 0.5 с. При этом отсутствие перерегулирования в контуре положения обеспечивается снижением коэффициента передачи регулятора положения на 20% от расчетного значения, а скомпенсировать ошибку слежения позволяет осуществить реализация принципа комбинированного регулирования [1].

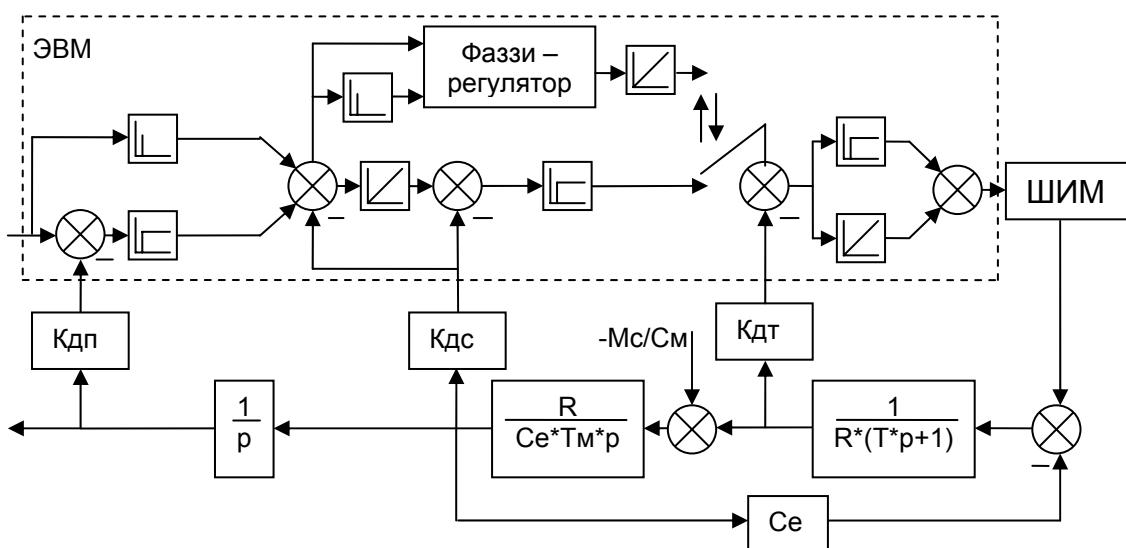


Рис. 1. Структурная схема цифровой системы управления

К минусам классической настройки относится то, что она не учитывает изменение параметров двигателя в зависимости от температурных, климатических условий, а также с ходом времени. Кроме того, следует учесть, что при настройке дорогостоящих систем пробные шаги нежелательны, а применение метода Зиглера–Никольса, сущность которого сводится к доведению системы до границы устойчивости с последующим определением коэффициентов настройки, недопустимо, и сам метод не всегда реализуем в нелинейных, цифровых системах [2].

Большинство современных систем управления строится на базе микроконтроллеров. Цифровая система управления, в отличие от аналоговой, позволяет осуществлять сложные алгоритмы управления, максимально реализующие потенциальные возможности привода. Но при этом разработчику по-прежнему необходимо знать об объекте управления практически все – механические и электрические характеристики двигателя, возможные воздействия со стороны механической части устройства. Поведение

системы описывает большое количество уравнений, содержащих различные коэффициенты, параметры, каждый из которых влияет на результат ее работы. Естественно, что для решения этих уравнений требуется высокопроизводительные и дорогие контроллеры. Кроме того, иногда часть параметров системы разработчику неизвестна либо требует уточнения, требуется возможность быстро изменять характер поведения системы. Встречаются задачи, формальное решение которых является сложным и трудно-реализуемым, при этом они достаточно легко решаются в терминах человеческого языка. В таких случаях альтернативой применению классических регуляторов является использование фаззи-регулятора. Фаззи-регулятор основывается на теории нечетких множеств, что позволяет настроить его даже в случае, когда параметры системы неизвестны, при этом точность регулирования определяется затратами на тренировку регулятора.

В данной работе рассматривается разработка аппаратного фаззи-регулятора на базе устройства ПЛИС Altera ACEX1K [3–5]. Особенностью аппаратной реализации является свобода в выборе разрядности разрабатываемого устройства и возможность распараллелить вычисления. В процессе работы были разработаны 8-, 12- и 15-разрядные устройства, поэтому в дальнейшем говорится о разработке  $n$ -разрядного устройства.

Для обеспечения функции регулирования достаточно реализовать  $n$  разрядный фаззи-регулятор с 2 входными переменными по 5 функций принадлежности для каждой, базой правил и 1 выходной переменной с 5 функциями принадлежности.

Задача сводится к реализации структурной схемы, представленной на рис. 2, которая является стандартной схемой фаззи-устройства, средствами ALTERA MAX+PLUS II [6].



Рис. 2. Структурная схема фаззи – регулятора

В блоке фаззификации четкие входные величины преобразуются в нечеткие – фаззифицируются. В блоке базы правил полученные в процессе фаззификации нечеткие входные переменные регулятора преобразуются в нечеткую выходную переменную в соответствии с выбранными правилами управления системой. В блоке дефаззификации полученные в базе правил нечеткая выходная переменная приводится к четкости – пересчитывается в четкое число, являющееся выходом регулятора.

Рассмотрим каждый из элементов структурной схемы.

**Фаззификация (на примере входной переменной « $e$ »).** Согласно структурной схеме (рис. 3), преобразование переменной « $e$ » в степень принадлежности одному из термов происходит параллельно на 5 блоках фаззификации.

**Блок фаззификации.** Схема предназначена для преобразования входной координаты « $e$ » в степень принадлежности « $eф$ ». Структурная схема устройства фаззификации представлена на рис. 4. С целью упрощения аппаратной реализации выбрана простейшая для расчета форма функций принадлежности – треугольник. Более сложная форма функций реализуема путем их разложения в ряд.

Расчетный блок решает уравнения  $eф1(e)=k1*e+b1$  и  $eф2(e)=k2*e+b2$ , логический блок определяет, к какому промежутку принадлежит вход « $e$ », и определяет выход схемы фаззификации следующим образом:

- 0, если вход « $e$ » больше координаты « $e3$ » или меньше координаты « $e1$ »;
- 1, если вход « $e$ » равен координате « $e2$ »;

- решение уравнения  $e\phi_1(e)=k1*e+b1$ , если вход «е» находится между координатами «e1» и «e2»;
- решение уравнения  $e\phi_2(e)=k2*e+b2$ , если вход «е» находится между координатами «e2» и «e3».

Фаззификация переменной « $de/dt$ » не отличается от фаззификации переменной «е».

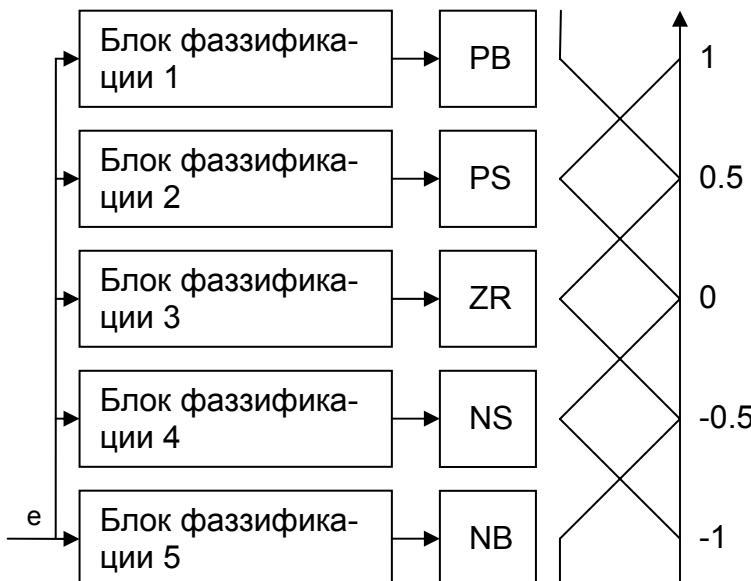


Рис. 3. Структурная схема устройства фаззификации

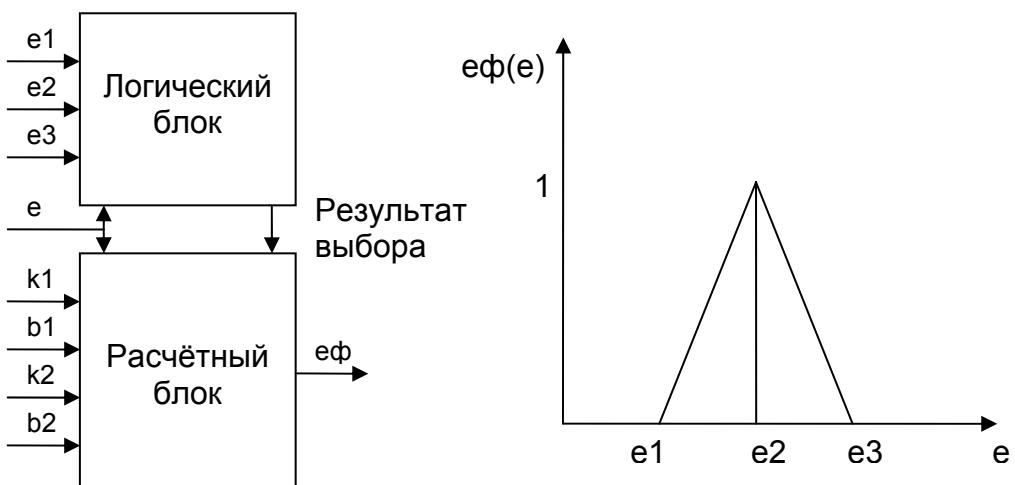


Рис. 4. Структурная схема блока фаззификации

**База правил.** При реализации на программируемой логике структурно база правил представляет собой комбинацию блоков «выбор большего» и «выбор меньшего» – эквивалентов логических «или»( $+$ ) и «и»( $*$ ). Различие состоит лишь в том, что логические операции применяются к битам, а правила – сразу к  $n$  разрядным числам.

База правил формируется исходя из цели функционирования устройства как регулятора. Входные величины регулятора – сигнал ошибки «е» и сигнал ее производной « $de/dt$ », выход – управляющее воздействие «и». Базу правил удобно представлять в виде таблицы (рис. 5) [7].

Выходы базы правил «и» согласно таблице (рис. 5) PB, PS, ZR, NS, NB описываются через входы «е» PB, PS, ZR, NS, NB и « $de/dt$ » PB, PS, ZR, NS, NB следующим

образом (для простоты записи входные переменные «е» заменены на  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  и « $de/dt$ » на  $y_1, y_2, y_3, y_4, y_5$ , а блоки «выбор большего» и «выбор меньшего» на «+» и «\*» соответственно):

$PB = x_5 * y_5 + x_4 * y_5 + x_5 * y_4 - 5$  операций-блоков;

$PS = x_2 * y_5 + x_3 * y_5 + x_3 * y_4 + x_4 * y_4 + x_4 * y_3 + x_5 * y_3 + x_5 * y_2 - 13$  операций-блоков;

$ZR = x_1 * y_5 + x_2 * y_4 + x_3 * y_3 + x_4 * y_2 + x_5 * y_1 - 9$  операций-блоков;

$NS = x_1 * y_4 + x_1 * y_3 + x_2 * y_3 + x_2 * y_2 + x_3 * y_2 + x_3 * y_1 + x_4 * y_1 - 13$  операций-блоков;

$NB = x_1 * y_1 + x_2 * y_1 + x_1 * y_2 - 5$  операций – блоков.

В целях сокращения числа блоков применим операцию выноса за скобки общего множителя (дистрибутивность):

$PB = (x_5 + x_4) * y_5 + x_5 * y_4 - 4$  операций-блоков;

$PS = (x_2 + x_3) * y_5 + (x_3 + x_4) * y_4 + (x_4 + x_5) * y_3 + x_5 * y_2 - 10$  операций-блоков;

$ZR = x_1 * y_5 + x_2 * y_4 + x_3 * y_3 + x_4 * y_2 + x_5 * y_1 - 9$  операций-блоков;

$NS = x_1 * (y_4 + y_3) + x_2 * (y_3 + y_2) + x_3 * (y_2 + y_1) + x_4 * y_1 - 10$  операций-блоков;

$NB = (x_1 + x_2) * y_1 + x_1 * y_2 - 4$  операций-блоков.

Экономия составляет 8 блоков.

		еф				
		NB	NS	ZR	PS	PB
def/dt	PB	ZR	PS	PS	PB	PB
	PS	NS	ZR	PS	PS	PB
	ZR	NS	NS	ZR	PS	PS
	NS	NB	NS	NS	ZR	PS
	NB	NB	NB	NS	NS	ZR

Рис. 5. База правил

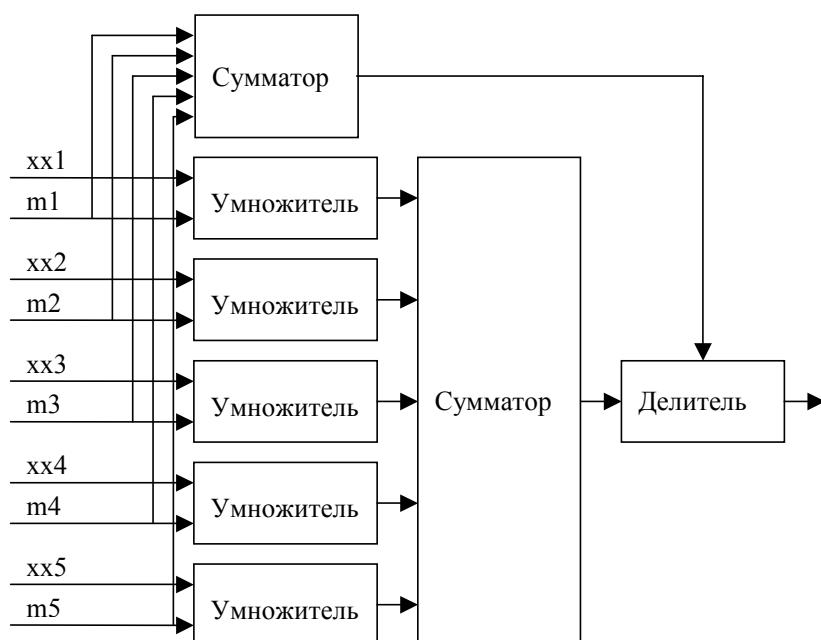


Рис. 6. Структурная схема устройства дефазификации

**Дефазификация.** Схема предназначена для преобразования координат функций принадлежности выходной переменной и полученных из базы правил степеней принадлежности этих функций в выходную величину регулятора – управление «*u*».

В данном регуляторе в целях упрощения вычислений функции принадлежности выходной переменной представляют собой дельта-функции (рис. 5), координаты которых «*xx1*», «*xx2*», «*xx3*», «*xx4*», «*xx5*».

Схема реализует вычисление следующей функции:

$$u = \frac{xx1m1 + xx2m2 + xx3m3 + xx4m4 + xx5m5}{m1 + m2 + m3 + m4 + m5},$$

где *m1*, *m2*, *m3*, *m4*, *m5* – степени принадлежности, полученные из базы правил. Структурная схема устройства представлена на рис. 6.

Таким образом, разработано устройство, реализующее алгоритм Fuzzy-регулятора.

Проведены моделирование, определившее быстродействие (1 мкс или 1 МГц) и проверка работоспособности разработанного устройства. Результаты моделирования в среде ALTERA MAX+PLUS II и на модели фаззи регулятора в среде Mathcad совпадают с точностью до младшего разряда.

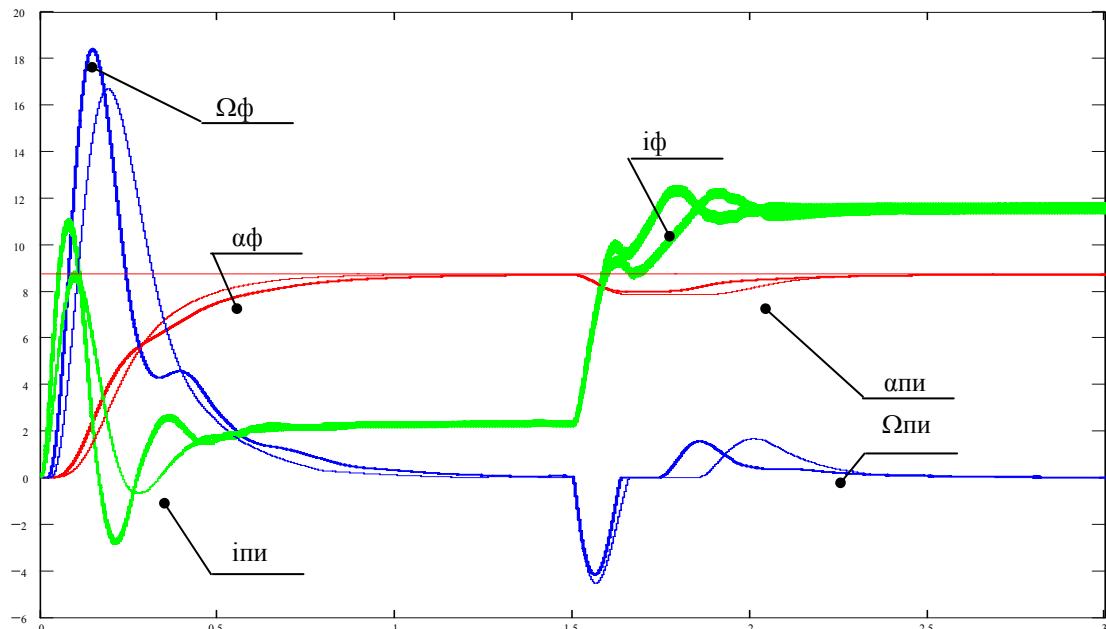


Рис. 7.. Результат моделирования систем с ПИ и фаззи-регуляторами:  
αф – угол, Ωф – скорость, iф – ток системы с фаззи – регулятором скорости; αпи – угол, Ωпи – скорость, iпи – ток системы с ПИ – регулятором скорости

График моделирования в среде Mathcad систем управления с ПИ и фаззи – регуляторами в контуре скорости (рис. 7), подтверждает, что фаззи-регулятор можно настроить как аналог ПИ-регулятора.

Описанный фаззи-регулятор относится к первому уровню систем искусственного интеллекта, развитие и применение которых в системах электропривода открывают широкие перспективы в улучшении характеристик систем.

## Литература

1. Кротенко В.В., Толмачов В.А., Томасов В.С., Синицин В.А. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства. // Приборостроение. 2004. Т. 47. №11. С 23–30.

2. Изерман Р. Цифровые системы управления (Rolf Isermann Digital control system) / Пер. с англ. С.П. Забородина, А.И. Титкова, А.В. Шалашова. Под ред. чл.-корр. АН СССР И.М. Макарова. М.: Мир, 1984.
3. Антонов А.П., В.Ф. Мелехин, А.С. Филиппов Обзор элементной базы фирмы ALTERA. Спб: Эфо, 1997.
4. [www.altera.ru](http://www.altera.ru)
5. [www.altera.com](http://www.altera.com)
6. Грушвицкий Р.И., А.Х. Мурсаев, Е.П. Угрюмов Проектирование систем на микросхемах программируемой логики. Спб: БХВ-Петербург, 2002.
7. Comparative analysis of classical and fuzzy pid control algorithms. Petr Pivonka, Petr Blaha, Brno, Czech Republic, 1999.

# КОНТРОЛЛЕР НАВЕДЕНИЯ ОСИ ТЕЛЕСКОПА С PCI-ИНТЕРФЕЙСОМ

К.М. Денисов, Ю.Ю. Янкин

В данной статье описывается реализация комбинированного цифрового управления в системе подчиненного регулирования положения на базе синхронного бесконтактного моментного двигателя ДБМ 1200-1200 и контроллера PCI-интерфейса, способного осуществлять пакетные целевые транзакции, на базе микросхем программируемой логики фирмы ALTERA.

## Введение

Контроллер предназначен для управления движением оптической оси телескопа по одной из координат, в соответствии с кодами задания, поступающими от ЭВМ верхнего уровня. При построении таких систем возникает широкий круг задач, связанных с необходимостью точного позиционирования и слежения, сопровождающегося вращением следящей оси с инфразвуковыми скоростями при значительных величинах моментов статического сопротивления и маховых масс на валу и возможном широком диапазоне их изменения. Обычно к таким системам предъявляются высокие требования по статическим и динамическим показателям.

Разрабатываемая система должна обеспечивать движение следящей оси в широком диапазоне углов с угловыми скоростями в диапазоне от  $10''/\text{с}$  до 1 град/с со среднеквадратичным значением ошибки не выше  $10''$  и позиционирование с точностью не хуже единиц угловых секунд при значительных значениях статического момента сопротивления нагрузки на оси. Также быстрое изменение аппаратных средств и рост вычислительной мощности ЭВМ верхнего уровня требуют использования современных интерфейсов, таких как шина PCI. Такие требования обусловливают необходимость реализации управления в цифровом виде.

При рассмотрении протокола PCI становится ясно, что разработка собственных PCI-устройств на логике малой и средней степени интеграции является сложной комплексной проблемой. Собственно протокол шины не так уж и сложен, но реализация требований к конфигурационным регистрам проблематична [1]. Серийные устройства PCI, как правило, являются однокристальными – в одной микросхеме размещается и интерфейсная, и функциональная части устройства [1]. Разработка таких микросхем весьма дорогостояща и имеет смысл лишь с перспективами массового выпуска. Для создания отладочных образцов и мелкосерийных изделий ряд фирм выпускают интерфейсные микросхемы PCI различного назначения [1]. Со стороны PCI практически все эти микросхемы поддерживают одиночные целевые транзакции (target transactions), совершенные модели допускают и пакетные циклы. Однако у них есть принципиальный недостаток: они имеют два интерфейса – интерфейс для PCI и пользовательский интерфейс, к которому должна подключаться схема периферийного устройства, что заставляет разработчика делать дополнительный интерфейс между своей схемой и интерфейсной микросхемой.

Интересно решение построения интерфейса PCI на конфигурируемой логике FPGA (Field Programmable Gate Array – программируемый массив вентилей). Здесь PCI-ядро, а также функции целевого и ведущего устройств занимают 10–15 тысяч вентилей в зависимости от требуемых функций. Микросхемы FPGA выпускаются на 10, 30, 50 и более тысяч вентилей. Оставшаяся часть может быть использована для реализации функциональной части устройства, внутренних регистров, регулятора, интерфейса с датчиком положения и т. д.

## Параметрический синтез цифровой системы подчиненного регулирования угла

Синтез системы проводился на основании методики, изложенной в [2]. Структурная схема системы с ПИ-регулятором положения представлена на рис. 1. Система со-

держит цифровые регуляторы положения, скорости и тока, ШИМ, силовой каскад и линеаризованную математическую модель двигателя.

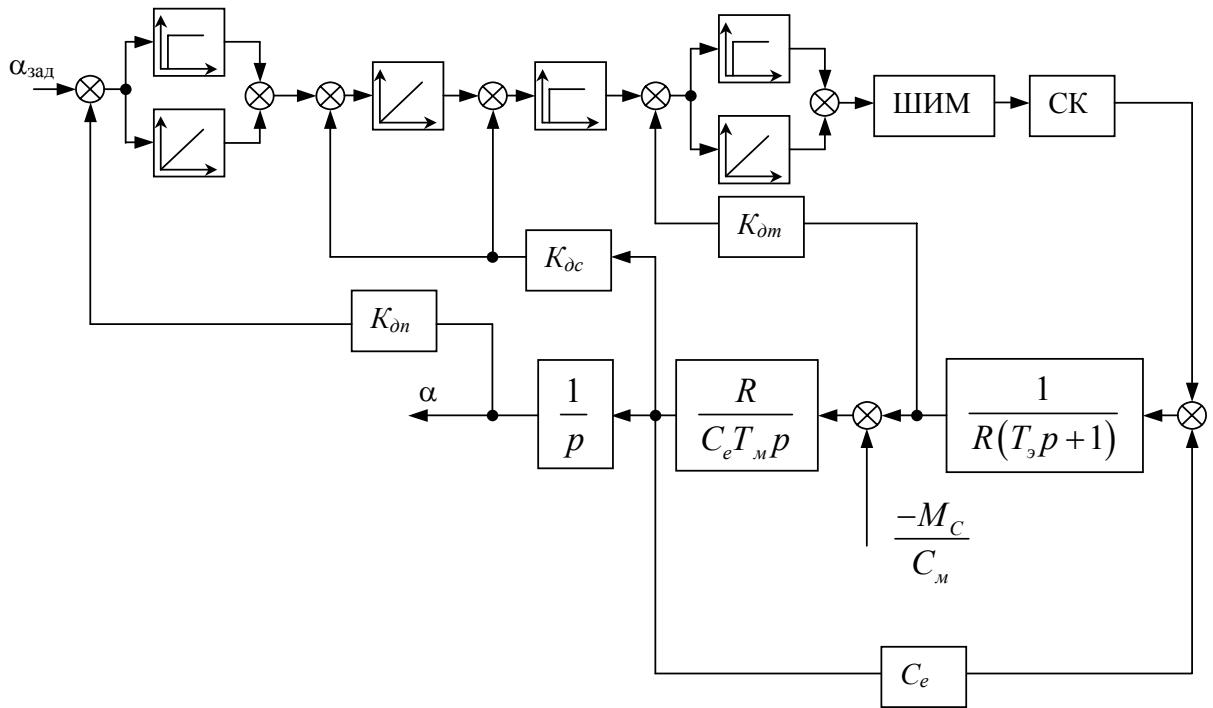


Рис. 1. Структурная схема системы подчиненного регулирования положения с цифровыми регуляторами

Параметры цифровых регуляторов с разделенными пропорциональным  $K_n$  и интегральным  $K_u$  каналами вычисляются на основании соотношений [2].

Коэффициенты цифрового ПИ-регулятора тока

$$K_{nn} = \frac{\left(1 - e^{\frac{-T_0}{T_m}}\right)R}{K_{\partial m} K_{cm} \left(1 - e^{\frac{-T_0}{T_s}}\right)}; K_{um} = \frac{\left(1 - e^{\frac{-T_0}{T_m}}\right)R}{K_{\partial m} K_{cm}},$$

где  $T_0$  – период дискретизации,  $T_m$  – эквивалентная постоянная времени контура тока,  $R$  – сопротивление фазы,  $K_{\partial m}$  – коэффициент передачи датчика тока,  $K_{cm}$  – коэффициент передачи усилителя мощности,  $T_s$  – постоянная времени фазы.

Коэффициенты цифрового регулятора скорости

$$K_{cn} = \frac{T_m C_e K_{\partial m}}{2T_{\mu c} R K_{dc}}; K_{cu1} = \frac{T_0}{4T_{\mu c}}; K_{cu2} = \frac{K_{cu1}}{2},$$

где  $T_m$  – механическая постоянная времени двигателя,  $C_e$  – коэффициент пропорциональности между ЭДС фазы и угловой скоростью двигателя,  $T_{\mu c}$  – постоянная времени контура скорости,  $T_{\mu c} = T_m + T_{\text{зап}}$ ,  $T_{\text{зап}}$  – запаздывание вносимое цифровыми регуляторами, равное  $T_0/2$ ,  $K_{dc}$  – коэффициент передачи датчика скорости.

Коэффициенты цифрового регулятора положения

$$K_{nn} = \frac{K_{dc}}{2T_{\mu n} K_{\partial n}}; K_{nu1} = \frac{K_{dc} T_0}{(8T_{\mu n}^2 K_{\partial n})}; K_{nu2} = \frac{K_{nu1}}{2},$$

где  $T_{\mu n}$  – постоянная времени контура положения,  $T_{\mu n} = 4T_{\mu c} + T_{\text{зап}}$ ,  $K_{\partial n}$  – коэффициент передачи датчика положения.

Коэффициент усиления производной равен  $K_{np} = 2T_{\mu n}$ .

Результаты моделирования в пакете MATLAB показали, что данная структура не удовлетворяет заявленным требованиям на низких скоростях слежения (10 угл. сек за сек) (рис. 2).

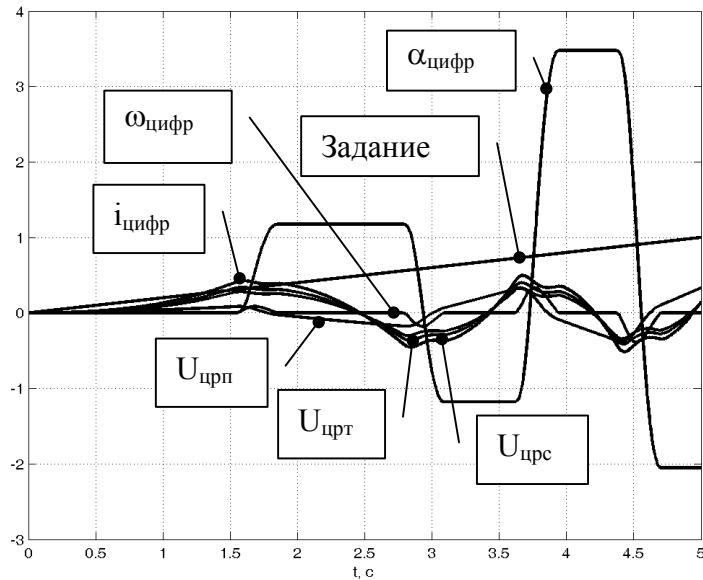


Рис. 2. Результаты моделирования цифровой системы регулирования положения с ПИ-регулятором в контуре положения

Обозначения, принятые на рисунках:  $i_{цифр}$  – ток в цифровой системе;  $\omega_{цифр}$  – скорость в цифровой системе;  $\alpha_{цифр}$  – угол в цифровой системе;  $U_{цирт}$  – выход цифрового регулятора тока;  $U_{цирс}$  – выход цифрового регулятора скорости;  $U_{цирп}$  – выход цифрового регулятора положения.

Использование П-регулятора в контуре положения также не дало требуемых результатов, так как ошибка на скоростях слежения, близких к максимальным, намного превышала допустимую (рис. 3). Было принято решение реализовать принцип комбинированного управления в контуре регулирования положения, а именно – подать на вход П-регулятора положения производную задания вместе с ошибкой. Такая структура позволила достичь требуемого качества слежения во всем диапазоне скоростей вращения следящей оси (рис. 4).

### Реализация на базе программируемой логики

Описание протокола шины PCI приведено в соответствующей литературе [1, 3].

Использование программируемой логики для реализации функциональной части устройства позволяет осуществлять вычисления управления с требуемой разрядностью (21 разряд), не прибегая к реализации сложных программных алгоритмов при использовании микроконтроллеров с меньшей разрядностью, и позволяет избежать использования микроконтроллеров с избыточной разрядностью, а также упростить разработку печатной платы. PCI-интерфейс, регулятор и интерфейс с датчиком положения реализованы аппаратно на одной микросхеме программируемой логики.

Разработка принципиальных схем контроллера шины PCI и функциональной части устройства велась в пакете MAX+plusII, доступном на сайте фирмы Altera [4]. Структурная схема устройства представлена на рис. 5. Она содержит собственно контроллер PCI-интерфейса и информационную подсистему контура положения, содержащую, в свою очередь, интерфейс с датчиком положения типа АЦПВТ-21П-Д1К, интерфейс с контуром регулирования скорости и системой точного времени, представляющей из себя генератор меток астрономического времени, регулятор положения.

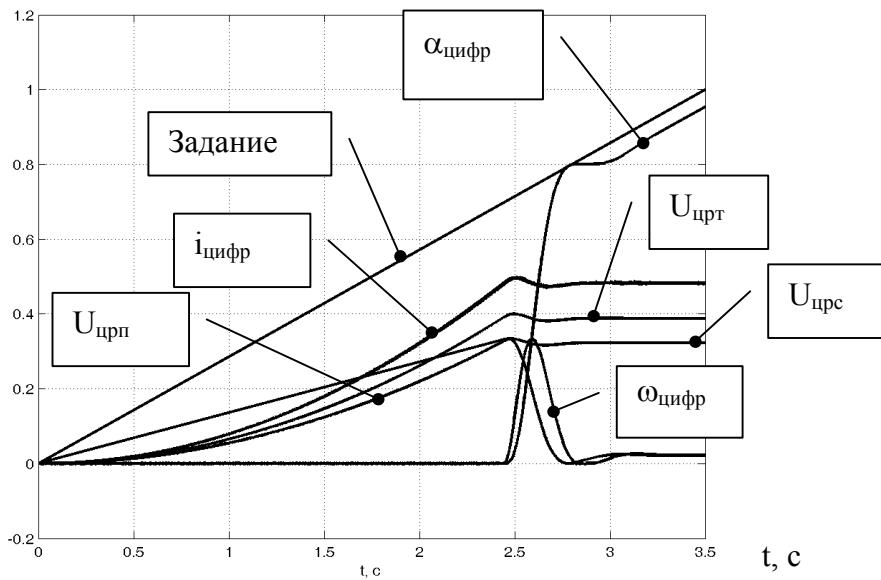


Рис. 3. Результаты моделирования цифровой системы регулирования положения с П-регулятором в контуре положения

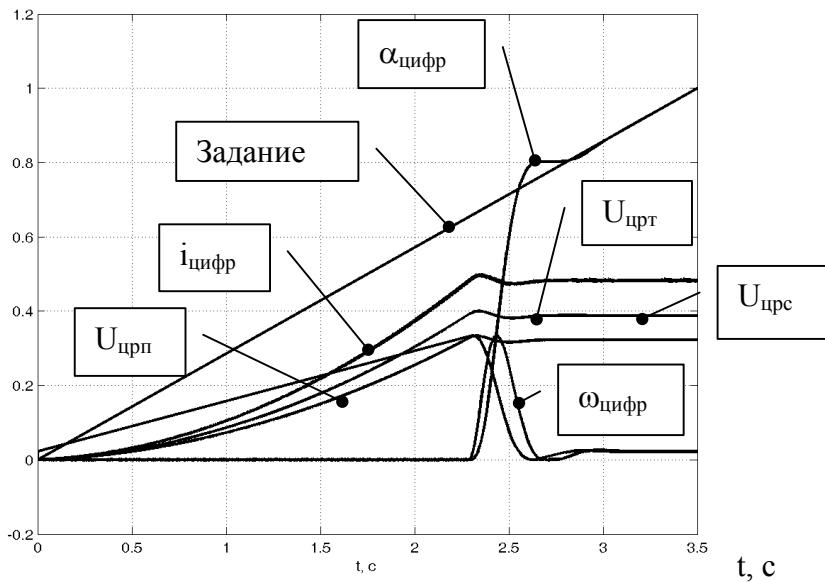


Рис. 4. Результаты моделирования цифровой системы регулирования положения с комбинированным управлением

Передача уставки по положению происходит по высокопроизводительному PCI-интерфейсу, вычисление управления происходит с повышенной разрядностью (умножение с накоплением осуществляется с двойной разрядностью). Также система позволяет менять коэффициенты регулятора в произвольный момент времени (кроме моментов вычисления управления) без внесения изменений в принципиальную схему, так как передача коэффициентов осуществляется по PCI-интерфейсу.

### Заключение

Была синтезирована математическая модель в среде MATLAB, описывающая цифровую систему подчиненного регулирования положения, проведен анализ влияния трех типов регуляторов (ПИ-, П-регулятора и комбинированного управления) на качество слежения на разработанной модели. Разработан контроллер PCI-интерфейса на ба-

зе программируемой логики, способный поддерживать целевые пакетные транзакции при обращении к конфигурационному пространству и пространству ввода-вывода, осуществлять проверку ошибок с использованием проверки четности, и проведено его моделирование в пакете MAX+plus II. Также в этом пакете разработан аппаратный цифровой регулятор, реализующий комбинированное управление, задержка вычисления которого составляет  $\sim 150$  нс, и проведено его моделирование. На базе программируемой логики разработаны принципиальные схемы, осуществляющие интерфейс с датчиком положения типа АЦПВТ-21П-Д1К и микропроцессорной системой регулирования скорости. Разработана конструкция PCI-совместимой печатной платы, реализующей названные выше функции, а именно: PCI-интерфейс, вычисление управления, интерфейс с датчиком положения и контуром регулирования скорости.

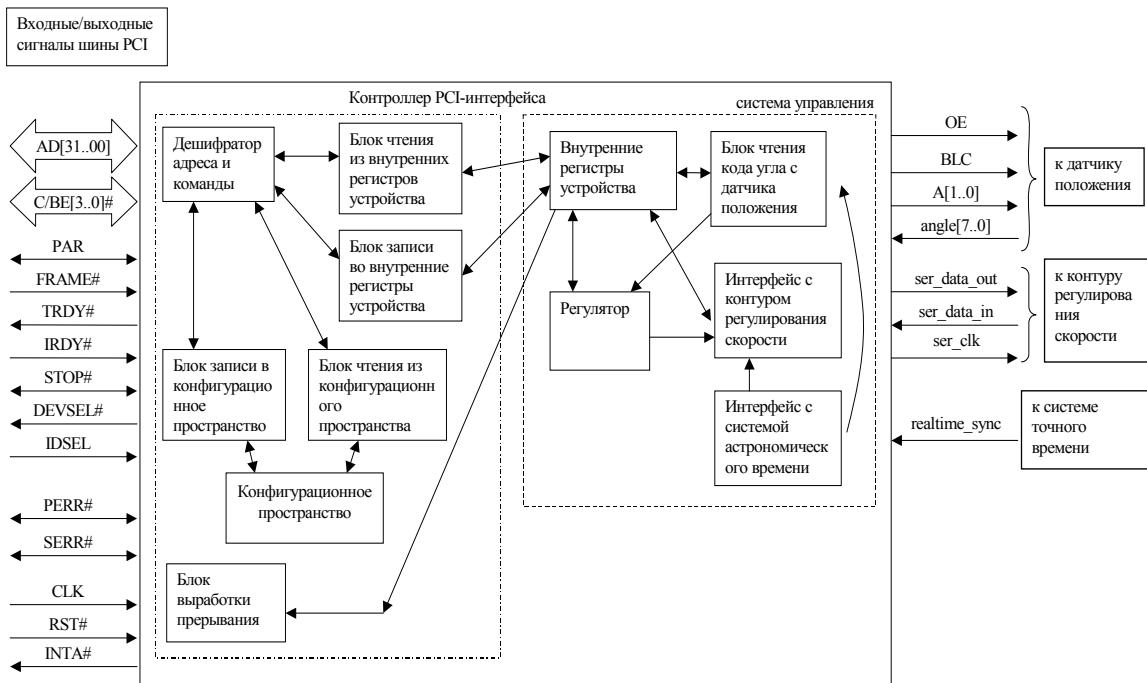


Рис. 5. Структурная схема контроллера наведения оси телескопа с PCI-интерфейсом

## Литература

1. Гук М.Ю. Аппаратные интерфейсы ПК. СПб: Питер, 2003. С. 175–211.
2. Кротенко В. В., Толмачев В. А., Томасов В.С., Синицын В. А. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 47. №11. С. 23–30.
3. «PCI Local Bus Specification. Revision 2.2» 1998, PCI SIG (Special Interest Group).
4. <http://www.altera.com>

# МНОГОМОДУЛЬНОЕ УСИЛИТЕЛЬНО - ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УСТРОЙСТВО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

В.А. Толмачев, М.В. Никитина, А.Н. Огородников

Даются рекомендации по выбору параметров  $N$ -модульного усилительно-преобразовательного устройства замкнутой системы регулирования скорости ДПТ и построению его на современной элементной базе.

При проектировании систем управления быстродействующих электроприводов с широким диапазоном регулирования скорости на основе высоковольтных малоинерционных двигателей постоянного тока с малой индуктивностью якоря возникает проблема построения усилительно-преобразовательных устройств (УПУ), обладающих высоким КПД и обеспечивающих полосу пропускания частот до 300–400 Гц. Построение таких УПУ на основе традиционных транзисторных широтно-импульсных преобразователей (ШИП) в ряде случаев не позволяет получить требуемых результатов из-за ограниченной на уровне 2–3 кГц частоты коммутации силовых транзисторных ключей ШИП. Эти относительно низкие частоты ограничивают, с одной стороны, предельно достижимые динамические характеристики систем электропривода, и с другой – обуславливают повышенные пульсации тока якоря ДПТ, приводящие к дополнительным потерям мощности в двигателе и к существенным пульсациям скорости вращения вала двигателя.

Повышение динамических показателей электропривода и снижение уровня пульсаций при заданной ограниченной частоте коммутации силовых транзисторных ключей ШИП возможно при использовании в системе управления многомодульного УПУ на основе идентичных транзисторных ШИП с многофазным принципом их синхронизации [1]. Один из вариантов построения энергетической подсистемы электропривода с  $N$ -модульным УПУ на основе реверсивных транзисторных ШИП представлен на рис. 1, где каждый ШИП подключен к якорю двигателя с индуктивностью  $L_{\text{я}}$  и активным сопротивлением  $R_{\text{я}}$  через развязывающий дроссель с индуктивностью  $L$  и омическим сопротивлением  $r$ .

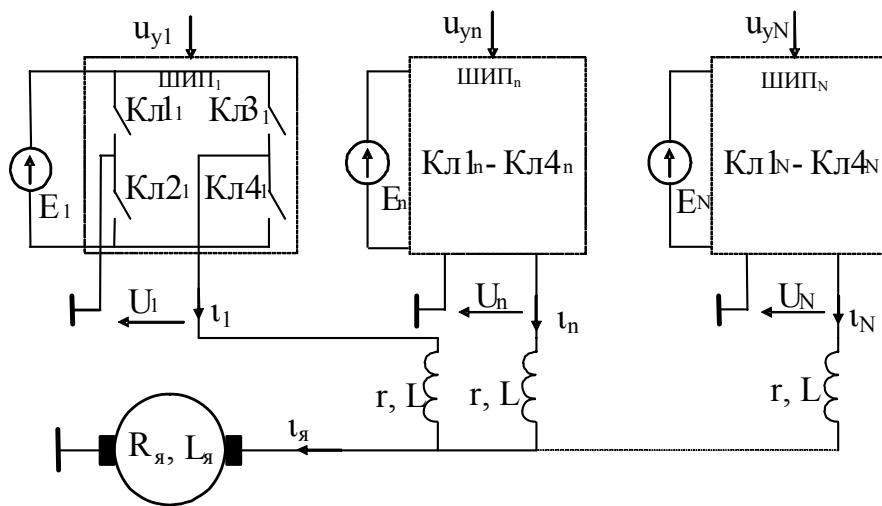


Рис. 1. Структурная схема  $N$ -модульного УПУ на основе ШИП

Выходное напряжение  $U_n$  каждого  $n$ -го ШИП УПУ представляет собой последовательность импульсов с периодом следования  $T_k$ , амплитудой  $E_n$  и относительной длительностью  $\gamma_n$  и полярностью, зависящими соответственно от величины и полярности сигнала управления  $u_{yn}$ .

С позиции теории управления многофазные системы с ШИП относятся к многосвязным и нелинейным импульсным системам, регулярных методов анализа и синтеза которых не существует. Наиболее перспективным и практически применимым на современном этапе является двухэтапный подход, при котором предварительный синтез осуществляется с использованием приближенных непрерывных моделей (линейных или нелинейных), а окончательный анализ с уточнением результатов предварительного синтеза проводится на ПЭВМ с использованием имитационных моделей, достаточно точно отражающих как электромагнитные процессы в системе «ШИП-нагрузка», так и дискретный характер сигналов в информационной подсистеме. Реализация такого подхода возможна на основе математического описания электромагнитных процессов в силовой цепи электропривода, приведенного в работе [1], и представленной на рис. 2 структурной схемы линейной модели, составленной относительно усредненных гладких составляющих координат электропривода [2], где  $K_{ycp} = 1/(r+N \cdot R_a)$ ,  $\tau_{ycp} = (L+N \cdot L_a)/(r+N \cdot R_a)$ ,  $K_{шип}$  – коэффициент передачи ШИП как линейного непрерывного звена.

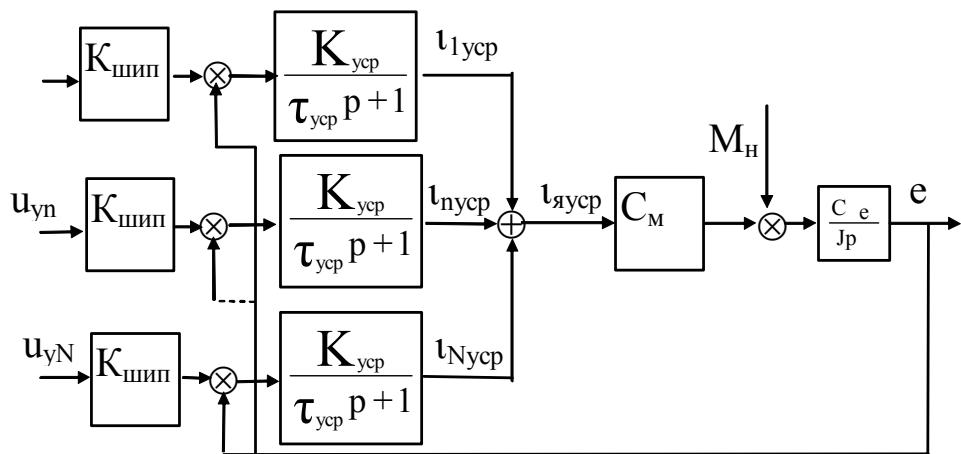


Рис. 2. Структурная схема линейной модели энергетической подсистемы

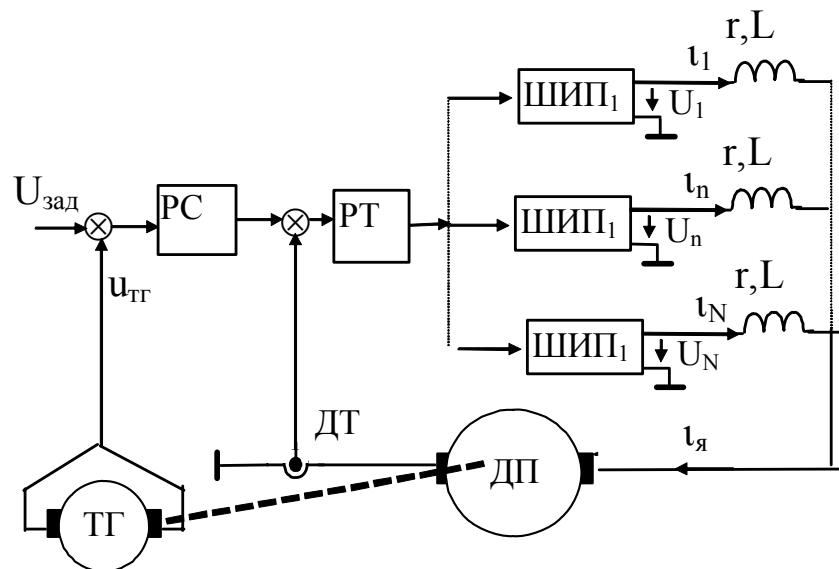


Рис. 3. Структурная схема двухконтурной системы регулирования скорости ДПТ с N-модульным УПУ

В данной работе излагается методика выбора параметров  $N$ -модульного усиительно-преобразовательного устройства для двухконтурной системы регулирования скорости ДПТ со структурной схемой, представленной на рис. 3, из условия обеспечения заданных предельных динамических качеств системы, и предлагается один из вариантов построения его энергетической и информационной подсистем на современной элементной базе. Вопросам синтеза двухконтурных систем регулирования скорости с цифровыми регуляторами тока якоря (РТ) и скорости (РС) посвящено достаточно много работ. Например, в статье [3] предложена методика параметрического синтеза из условия обеспечения предельного быстродействия при заданных параметрах энергетической подсистемы (ШИП и ДПТ). При этом полагается, что микроконтроллер, специализированный для задач управления электроприводами, осуществляет модуляцию выходных импульсов ШИП по закону ШИМ1 [4] и задан период коммутации силовых ключей ШИП  $T_k$ . Синтез состоит в выборе параметров цифровых регуляторов из условия настройки внешнего контура регулирования скорости на симметричный оптимум. Предельное быстродействие синтезированной системы, как и величина динамического выброса скорости при реакции системы на скачкообразные возмущения по нагрузке, пропорциональны реализуемой постоянной времени контура регулирования тока  $T_t = T_k/N$  и определяются в конечном итоге периодом коммутации силовых ключей ШИП.

Как показано в работах [5, 6] и др., в системах управления с  $N$ -модульными УПУ на основе транзисторных ШИП с многофазным принципом их синхронизации эквивалентная постоянная времени контура регулирования тока может быть снижена до величины  $T_t = T_k/N$ .

Изложенная ниже методика синтеза содержит выбор числа модулей  $N$  УПУ из условия обеспечения требуемого предельного быстродействия электропривода при заданной частоте коммутации собственно силовых ключей ШИП каналов, расчет индуктивностей  $L$  разделительных дросселей каналов из условия обеспечения заданного максимально допустимого размаха пульсаций тока якоря ДПТ при выбранном числе каналов  $N$  и расчет параметров цифровых регуляторов тока якоря и скорости при уже известных  $N$  и  $L$ .

При питании всех ШИП УПУ от одного общего источника с использованием приведенной на рис. 2 линейной модели энергетической подсистемы эквивалентная схема контура регулирования тока якоря может быть представлена в виде, показанном на рис. 4, где РТ – цифровой ПИ-регулятор тока с выходным сигналом  $U_{\text{пи}}(i)$ , формируемым в дискретные моменты времени  $i = t/T_0$ .

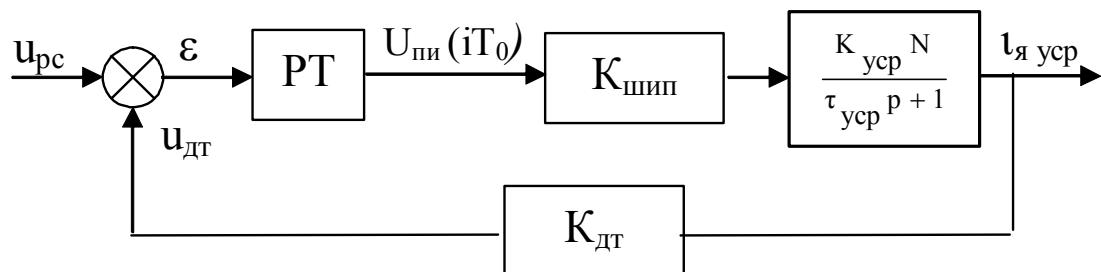


Рис. 4. Расчетная модель контура регулирования тока якоря

Структурно регулятор содержит пропорциональный (П) и интегральный (И) каналы и формирует сигнал управления на входах всех ШИП в соответствии с алгоритмом

$$U_{\text{пи}}(i) = U_{\text{п}}(i) + U_{\text{и}}(i),$$

$$U_{\text{п}}(i) = K_{\text{пт}} \cdot \varepsilon(i),$$

$$U_{\text{и}}(i) = U_{\text{и}}(i-1) + K_{\text{ит}} \cdot \varepsilon(i-1),$$

где  $\varepsilon(i)$ ,  $K_{\text{пт}}$ ,  $K_{\text{ит}}$ ,  $U_{\text{п}}(i)$ ,  $U_{\text{и}}(i)$  – соответственно ошибка на входе регулятора тока, коэффициенты передачи П- и И-каналов и их сигналы, вычисленные в дискретные момент времени  $i$ . Тогда при выборе коэффициентов передачи пропорционального  $K_{\text{пт}}$  и интегрального  $K_{\text{ит}}$  каналов на основании соотношений

$$K_{\text{пт}} = (1 - e^{-T_0/T_{\text{т}}}) / [N \cdot K_{\text{уср}} \cdot K_{\text{дт}} \cdot K_{\text{шп}} \cdot (1 - e^{-T_0/\tau_{\text{уср}}})],$$

$$K_{\text{ит}} = (1 - e^{-T_0/T_{\text{т}}}) / (N \cdot K_{\text{уср}} \cdot K_{\text{дт}} \cdot K_{\text{ст}})$$

замкнутый контур регулирования тока якоря можно представить апериодическим звеном первого порядка с коэффициентом передачи  $1/K_{\text{дт}}$  и постоянной времени  $T_{\text{т}}$ . При такой замене расчет параметров цифрового ПИ-регулятора внешнего контура можно осуществить по методике, изложенной в работе [4].

Выбор количества модулей  $N$  и индуктивностей  $L$  разделительных дросселей каналов должен обеспечить как заданные предельные динамические характеристики проектируемой системы электропривода, так и требуемые допустимые амплитуды пульсаций токов нагрузки и дросселей каналов при заданных параметрах двигателя и частоте  $f_{\text{k}}$  (периоде  $T_{\text{k}}=1/f_{\text{k}}$ ) коммутации силовых ключей ШИП каналов.

При настройке внешнего контура регулирования скорости на «симметричный оптимум» минимальное время отработки скачкообразных задающих и возмущающих воздействий  $t^*$ , также как и величина максимального динамического выброса скорости при скачкообразном изменении момента нагрузки, пропорциональны значениям некомпенсированной постоянной времени  $T_{\mu}$ , складывающейся из эквивалентной постоянной контура регулирования тока якоря  $T_{\text{т}}$  и времени запаздывания  $T_{\text{зап}}$ , обусловленного цифровой системой обработки сигнала тахогенератора, т.е.

$$T_{\mu} = 2 \cdot T_{\text{т}} + T_{\text{зап}}$$

Учитывая, что  $t^* = 12 \cdot T_{\mu}$  (при настройке на симметричный оптимум) и принимая  $T_{\text{т}} = T_{\text{k}}/N$  и  $T_{\text{зап}} = T_0/2 = T_{\text{k}}/2N$ , можно сформулировать условие для выбора числа модулей  $N$  УПУ при заданном периоде коммутации силовых ключей  $T_{\text{k}}$  и требуемом времени отработки возмущений  $t^*$  в виде

$$N \geq 30 \cdot T_{\text{k}} / t^*. \quad (1)$$

Далее при выбранном числе модулей УПУ следует осуществить расчет индуктивностей разделительных дросселей каналов из условия обеспечения допустимого уровня пульсаций тока якоря и каналов в квазиустановившемся режиме работы привода.

Анализу квазиустановившегося режима работы источника тока с  $N$ -модульным УПУ, построенным на основе идентичных реверсивных транзисторных ШИП, при многофазном принципе синхронизации работы последних посвящена работа [7]. Приведенные там результаты могут быть адаптированы и к расчету параметров пульсаций токов якоря и разделительных дросселей каналов в системе «многомодульный УПУ–ДПТ».

Максимальное значение размаха пульсаций тока якоря  $2\Delta I_{\text{я,макс}}$  связано с параметрами силовой цепи привода соотношением [7]

$$\chi_{\text{макс}}^{(\text{н})} = - \frac{r + R_{\text{я}}}{r + N R_{\text{я}}} \times \frac{(2e^{-1/2N\beta} - e^{-1/N\beta} - 1)}{1 - e^{-1/N\beta}},$$

где  $\chi_{\text{макс}}^{(\text{н})} = 2 \cdot \Delta I_{\text{я,макс}} \cdot (r + R_{\text{я}}) / E$  – максимальное значение коэффициента пульсаций и  $\beta = \tau_{\text{уср}} / T_{\text{k}}$  – относительная постоянная времени. Приравнивая  $\chi_{\text{макс}}^{(\text{н})} = \chi_{\text{доп}}$  и разрешая последнее выражение относительно  $\beta$ , получим зависимость  $\beta(\chi_{\text{доп}}, N)$  в виде

$$\beta = \frac{1}{2N} \left( \ln \frac{r + R_{\text{я}} + \chi_{\text{доп}}(r + N R_{\text{я}})}{r + R_{\text{я}} - \chi_{\text{доп}}(r + N R_{\text{я}})} \right)^{-1}. \quad (2)$$

Зная заданное значение допустимого коэффициента пульсаций тока якоря  $\chi_{\text{доп}}$ , из выражения (2) можно найти требуемое значение относительной постоянной времени  $\beta$  и далее значение индуктивности дросселя канала как

$$L = \beta \cdot T_k \cdot (r + N \cdot R_a) - N \cdot L_a. \quad (3)$$

Функциональная схема 3-х модульного УПУ с системой управления, обеспечивающей в двухконтурной системе регулирования скорости малоинерционного двигателя с гладким якорем ПГТ-4 амплитуду пульсаций тока якоря  $\leq 1$  А и время  $t^* \leq 4$  мс при частоте коммутации силовых ключей 2 кГц, представлена на рис. 5.

В состав системы входят микроконтроллер (МК), ШИМ-генератор (ШИМ), устройство управления силовыми ключами (УУСК) и выходной каскад (ВК). Микроконтроллер ADSP 21992 [8] программно реализует ПИ-регуляторы тока якоря и скорости ДПТ. Выходной сигнал  $u_{\text{дт}}$  датчика тока ДТ поступает на вход встроенного в МК 14-битного АЦП. Масштабированный сигнал  $u_{\text{тг}}$  от тахогенератора поступает на 16-битный АЦП (AD7694). АЦП соединен с контроллером через SPI интерфейс. От внешнего устройства в контроллер поступает задание скорости в виде цифрового кода. Контроллер обменивается информацией с внешним устройством управления с помощью интерфейса CAN. Приемопередатчик данного интерфейса реализован на микросхеме PCA82C251 фирмы Philips.

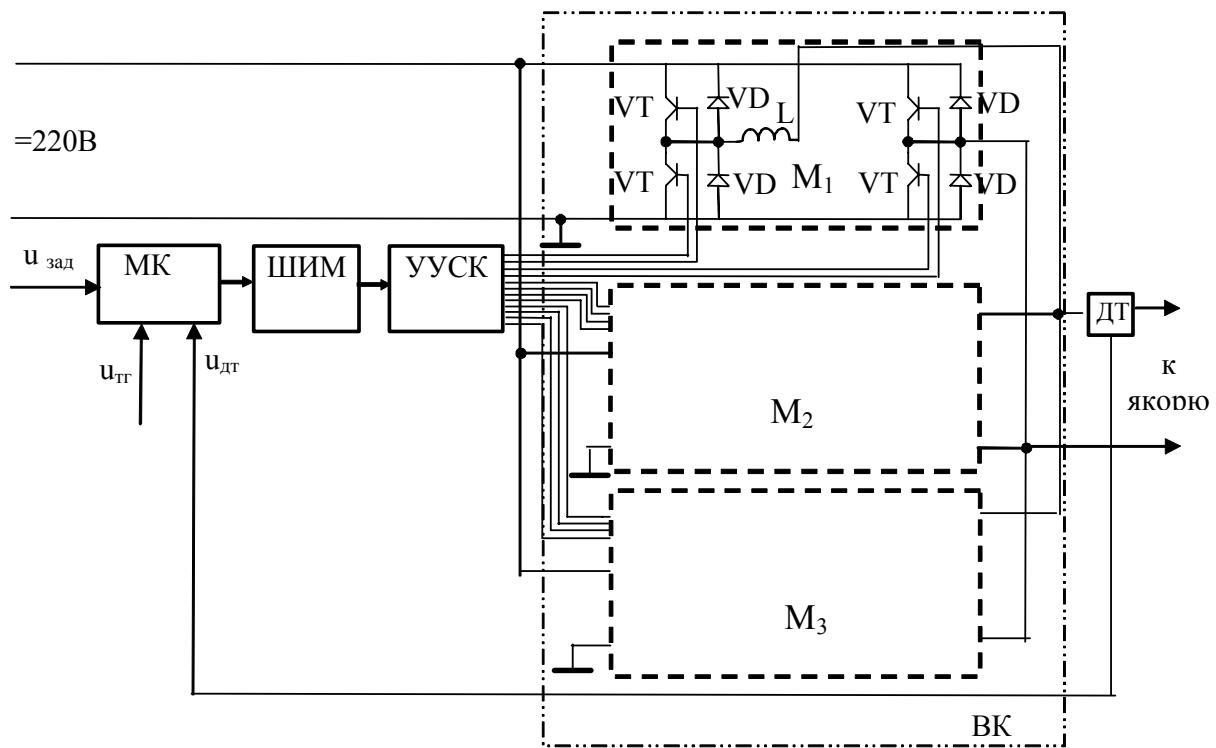


Рис. 5. Функциональная схема системы управления с трехмодульным УПУ

После вычисления сигнал управления поступает от микроконтроллера на вход ШИМ-генератора, построенного на основе микросхемы программируемой логики (ПЛ) EP1K10 [9]. Последняя формирует трехканальный широтно-модулированный сигнал (закон ШИМ1) со сдвигом фаз между каналами  $120^\circ$ , необходимым для управления силовыми ключами трехмодульного выходного каскада. Для связи микроконтроллера и микросхемы ПЛ используется параллельный интерфейс.

С выхода ШИМ-генератора сигналы TTL-уровня поступают на входы устройства управления силовыми ключами (УУСК). Последнее выполняет одновременно функции

гальванической развязки входных и выходных цепей, защиты силовых транзисторов выходного каскада от перегрузок по току и формирования задержек на включение транзисторов каждой из стоек выходного каскада для предотвращения токов сквозного короткого замыкания. УУСК построено на базе шести специализированных микросхем драйверов IR2108 [10]. Питание всех драйверов осуществляется от внешнего стабилизированного источника питания с напряжением +15 В.

Выходной каскад состоит из трех идентичных модулей ( $M_1$ – $M_3$ ), каждый из которых собран на четырех ( $VT_1$ – $VT_4$ ) IGBT-транзисторах IRG4PSC71KD [10] со встроенными обратными диодами ( $VD_1$ – $VD_4$ ) по типовой мостовой схеме. В выходную диагональ каждого модуля включен разделительный дроссель с индуктивностью  $L$ . Последовательно с якорем включено устройство измерения тока якоря (ДТ), собранное на базе специализированной микросхемы IR2175 [11]. Питание всех модулей выходного каскада осуществляется от одного внешнего силового источника питания постоянного тока с напряжением 220 В.

## Заключение

1. Разработанная методика синтеза двухконтурных систем регулирования скорости ДПТ предполагает: выбор числа модулей УПУ  $N$  из условия обеспечения заданных предельных динамических характеристик; расчет индуктивностей разделительных дросселей каналов УПУ из условия обеспечения допустимого уровня пульсаций тока якоря при расчетном значении  $N$  и заданной частоте коммутации силовых ключей ШИП каналов; расчет параметров цифровых регуляторов контуров из условия реализации заданных динамических характеристик привода при выбранных параметрах энергетической подсистемы. Правомерность методики подтверждена результатами математического моделирования.

2. Полученные результаты закладывают основу для использования принципа агрегирования при создании УПУ для систем управления электроприводов постоянного тока, предполагающего создание УПУ разной мощности из унифицированных узлов, сокращение количества типоразмеров преобразователей при относительной простоте наращивания выходной мощности, технологичность изготовления и удобство настройки и обслуживания.

## Литература

1. Толмачев В.А. Уравнения электромагнитных процессов в силовой цепи электропривода постоянного тока с многомодульным усилительно-преобразовательным устройством. / Труды III Международной (XIV Всероссийской) научно-технической конференции по автоматизированному электроприводу «АЭП-2001» (Нижний Новгород 12-14 сентября 2001). Под ред. С.В. Хватова. Нижний Новгород: «Вектор-ТиС», 2001. С. 75–77.
2. Огородников А.Н., Толмачев В.А. Непрерывная модель энергетической подсистемы электропривода постоянного тока с многофазным импульсным усилительно-преобразовательным устройством. / XXXII Неделя науки СПбГПУ: Материалы межвузовской научно-технической конференции. Ч. V. Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 109–111.
3. Кротенко В.В., Толмачев В.А., Томасов В.С., Синицын В.А. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства. // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т.47. №11. С.23–31.
4. Толмачев В.А., Денисов К.М. Проблемы реализации микропроцессорных систем управления источников тока программируемой формы. // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т.43. №1–2. С.75–80.

5. Толмачев В.А. Синтез системы управления многомодульного источника тока с индуктивным фильтром// Изв. вузов. Приборостроение. 2001. Т.44. №3. С.16–22.
6. Толмачев В.А. Синтез системы управления многомодульного источника тока с индуктивно-емкостным фильтром// Изв. вузов. Приборостроение. 2002. Т.45. №4. С.33–39.
7. Толмачев В.А., Никитина М.В. Расчет параметров квазиустановившегося режима в источнике тока с импульсным усилительно-преобразовательным устройством и индуктивным сглаживающим фильтром. / Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Выпуск 3. Физические процессы, системы и технологии точной механики. Главный редактор В.Н. Васильев. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2001. С.120–126.
8. Соловьев А., Веселов М. Семейство DSP-микроконтроллеров фирмы Analog Devices для встроенных систем управления двигателями. / CHIP NEWS. 1999. №1. С. 17–23.
9. ACEX 1K Programmable Logic Device Family Data Sheet. Altera. May 2003, ver. 3.4
10. [www.irf.com](http://www.irf.com)

# ТЕСТИРУЮЩАЯ ПРОГРАММА

## В.А. Гурьянов, М.В. Шашков

Создана тестирующая программа, позволяющая проводить тесты по любым дисциплинам.

Дистанционное обучение, которому уделяется большое внимание [1], требует создания все более совершенных тестов, позволяющих проводить аттестацию студентов по широкому спектру вопросов. Данная тестирующая программа позволяет решать следующие задачи:

1. проведение обкатки и доработки тестов на кафедре, прежде чем выносить их на университетский круг обсуждения;
2. проведение 15–20-минутного блиц-контроля знаний студентов, не прерывая занятия.

Множество подобных систем представлено в Интернете, но все они обладают свойствами, делающими их непригодными для использования: либо они коммерческие и закрыты для доработки, либо вид задаваемых вопросов-ответов слишком примитивен.

Созданная тестирующая программа позволяет составлять тесты 8 видов:

1. найти правильный ответ;
2. выбрать один правильный ответ из нескольких правильных и неправильных;
3. выбрать все правильные ответы;
4. расположить ответы в нужном порядке;
5. указать соответствие между двумя столбцами;
6. ввести численный ответ с точностью до 1%;
7. ввести символьный ответ;
8. задать числовую оценку каждого ответа.

Тест может быть создан в любом простом текстовом редакторе и содержать любое количество вопросов (либо вида 1–7, либо только вида 8). Внутри вопросов и ответов можно вставлять HTML-теги форматирования текста, вставки любых символов, картинок, мультилипликации, звуков.

Папка (test) с программами, тестами и картинками помещается на Web-сайт кафедральной (или локальной) сети. Для работы тестов нужен веб-сервер с поддержкой PHP – после этого любой желающий в любое время из любого места (если сеть подключена к Интернету) может получить доступ к тестам.

При тестировании вопросы выбираются случайным образом. Ответы внутри вопроса каждый раз располагаются в случайном порядке. Результаты тестирования записываются в файл, удобный для просмотра и распечатки.

Программа тестирования с исходными текстами на PHP и контрольным тестом распространяется бесплатно.

Примеры написания тестов приведены в Help-файле. Ниже приведены образцы тестируемых вопросов (вида 3, 4, 5):

Какие из перечисленных ниже параметров ШПП определяют его быстродействие как звена САР?
<input type="checkbox"/> частота коммутации силовых ключей
<input type="checkbox"/> напряжение силового источника питания
<input checked="" type="checkbox"/> падение напряжения на открытых ключах
<input type="checkbox"/> амплитуда опорного пилообразного напряжения широтно-импульсного модулятора (ШПИМ)
<input checked="" type="checkbox"/> внутреннее сопротивление силового источника питания
<input type="button" value="следующий вопрос"/>

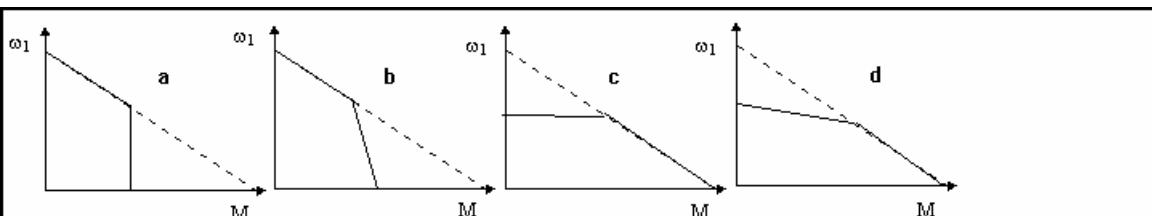
Рис.1. Вопрос вида 3

Составьте хронологический ряд из следующих событий:

- запуск первого многоместного корабля "Восход";
- полет в космос Г. Титова;
- первый полет женщины в космос;
- первый выход человека в открытый космос;
- первый многодневный групповой полет двух космических кораблей;

[следующий вопрос](#)

Рис. 2. Вопрос вида 4



Найти соответствие между приведёнными характеристиками и их определениями:

- механическая характеристика одноконтурной системы регулирования скорости ДПТ с ШПП и П-регулятором
- 1.d  механическая характеристика одноконтурной системы регулирования момента с ШПП и ПИ-регулятором
- 2.b  механическая характеристика одноконтурной системы регулирования скорости ДПТ с ШПП и ПИ-регулятором
- 3.a  механическая характеристика одноконтурной системы регулирования момента ДПТ с ШПП и П-регулятором
- 4.c  механическая характеристика одноконтурной системы регулирования момента ДПТ с ШПП и П-регулятором

[следующий вопрос](#)

Рис. 3. Вопрос вида 5

Поскольку приведены все исходные коды, тестирующая программа легко дополняется новыми видами вопросов и модифицируется под конкретные нужды пользователя. Познакомиться с программой или скачать ее можно на сайте кафедры: [www.ets.ifmo.ru](http://www.ets.ifmo.ru).

### Литература

1. Васильев В.Н., Стafeев С.К. Единая система компьютерного тестирования: состояние и перспективы. / Научно-технический вестник СПб ГИТМО (ТУ), 2001, вып. 1. С. 5–22.

# ЛАБОРАТОРИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В КУРСЕ «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ И ЭЛЕКТРОННЫЕ АППАРАТЫ»

Н.А. Мирошин, В.И. Соловьев

Рассмотрены возможности реализации математического моделирования физических процессов, протекающих в электрических аппаратах, с помощью системы компьютерной математики Mathematica. В качестве примера приведена модель, предназначенная для расчета магнитных цепей электрических аппаратов постоянного тока.

Одним из направлений работы кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем является внедрение компьютерных технологий в учебный процесс [1]. В силу известных причин актуальной задачей является создание лабораторий компьютерного моделирования, в частности, в курсе «Электрические и электронные аппараты».

Для создания математических моделей используются цифровые или аналоговые вычислительные устройства. Исторически первыми для этих целей использовались аналоговые устройства, достоинствами которых по сравнению с цифровыми устройствами являются простота модели и самого процесса моделирования, а также наглядность результатов при непрерывном воспроизведении заданной математической зависимости.

Широко распространенная программа Electronics Workbench, работающая на платформе Windows, позволяет проводить моделирование различных устройств электромеханики и автоматики с сохранением наглядности и простоты аналоговых моделирующих устройств [2]. Однако недостатки, присущие аналоговой технике, эта программа, к сожалению, также сохраняет.

В настоящее время на стыке математики и информатики сформировалось новое направление – компьютерная математика. Это совокупность аппаратных и программных средств, обеспечивающая решение на компьютерах математических задач практически любых классов и любой сложности. Основным программным средством компьютерной математики стали системы компьютерной математики (СКМ), ориентированные на решение как численных, так и аналитических задач. Одной из самых мощных СКМ является Mathematica.

Дифференциальные уравнения являются основой при решении задач моделирования, особенно в динамике. Немногие математические системы имеют реализации численных методов решения систем дифференциальных уравнений. Система Mathematica имеет средства как для символьного, так и для численного решения дифференциальных уравнений и их систем [3]. Решение большинства математических задач в системе может проводиться в диалоговом режиме без традиционного программирования.

Компьютерное моделирование предоставляет возможность фронтального метода проведения лабораторных работ и многовариантность заданий.

Далее приведен перечень лабораторных работ по электромеханическим электрическим аппаратам, в которых математические модели выполнены средствами СКМ Mathematica 4.

- Расчет магнитных цепей электрических аппаратов постоянного тока. Трудность расчета магнитных цепей, прежде всего, обусловлена нелинейной зависимостью магнитной индукции от напряженности магнитного поля. В инженерной практике применяют ряд упрощенных методов, наиболее распространенными среди которых являются методы расчета по участкам, по коэффициентам рассеяния и графоаналитический метод. Они основаны на применении метода Эйлера (численное интегрирование). Основное допущение метода Эйлера – постоянство производной искомой функции в пределах некоторого конечного участка. В СКМ для численного решения дифференциальных уравнений используется функция NDSolve[eqns, y, {x,

$x_{\min}, x_{\max}\}].$  Вывод результатов решения дифференциальных уравнений в графической форме выполняется функцией  $\text{Plot}[f, \{x, x_{\min}, x_{\max}\}].$

- Расчет тягового усилия электромагнита. Расчет проводится с учетом зависимости индуктивности обмотки от величины воздушного зазора, меняющейся при движении якоря. Зависимость индуктивности обмотки с сердечником от величины протекающего по ней тока, характерная для систем с глубоким насыщением магнитопровода, не рассматривается.
- Расчет процесса включения электромагнита с насыщенной магнитной системой.
- Моделирование электродинамических механизмов.
- Расчет динамических характеристик индукционно-динамических механизмов.
- Расчет нагрева цилиндрической катушки электрического аппарата. Рассматривается установившийся режим. Определение величины и координаты максимальной температуры выполняется с помощью функции  $\text{FindMinimum}[-f, \{x, x_0\}].$
- Моделирование вибрации включающихся контактов.

В качестве примера рассмотрим модель магнитной системы электрического аппарата постоянного тока.

Зависимость магнитного сопротивления стали магнитопровода от величины магнитного потока вычисляется с помощью функции  $R = \text{Fit}[\text{spis}, \{\Phi[x]^8\}, \Phi[x]].$

График функции  $R=f(\Phi)$  представлен на рис.1. При построении этого графика использована функция  $\text{Show}.$

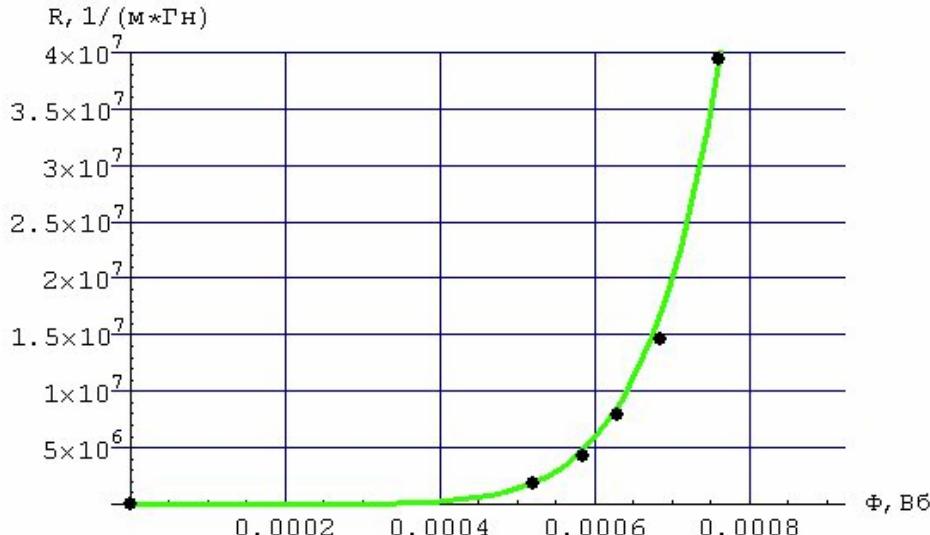


Рис. 1. Магнитное сопротивление стали

Решением системы нелинейных дифференциальных уравнений для разности магнитных потенциалов и магнитного потока выполняется с помощью функции

```
NDSolve [{U'[x] = Iw/h - Φ[x]*2*R, Φ'[x] = -U[x]*g, Φ[h] = Φδ, U[h] = Uh}, {U, Φ}, {x, 0, h}]
{{U → InterpolatingFunction [{0., 0.1}], Φ → InterpolatingFunction [{0., 0.1}], <>}}
```

График зависимости магнитных потенциалов  $U=U(x)$  представлен на рис.2.

```
gu1 = Plot[% , {x, 0., 0.1}, PlotStyle → {Thickness [0.008], Hue[0.]}, Plotrange → Automatic, AxesLabel → {"x, м", "U, А"}, GridLines → Automatic, DefaultFont → {"Courier", 14.}];
```

График зависимости магнитного потока  $Φ=Φ(x)$  представлен на рис. 3.

```
gu1 = Plot[% , {x, 0., 0.1}, PlotStyle → {Thickness [0.007], Hue[0.]},
```

```
Plotrange → Automatic, AxesLabel → {"x, м", "Φ, Вб"}, GridLines → Automatic, DefaultFont → {"Courier", 14.}];
```

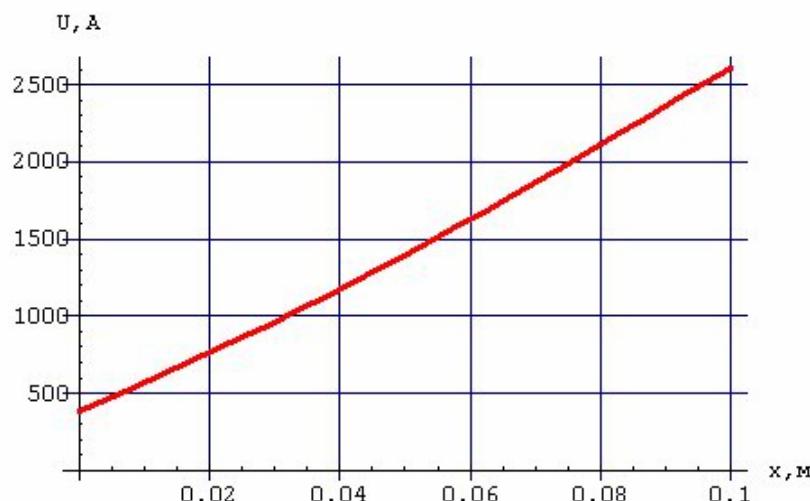


Рис. 2. Разность магнитных потенциалов

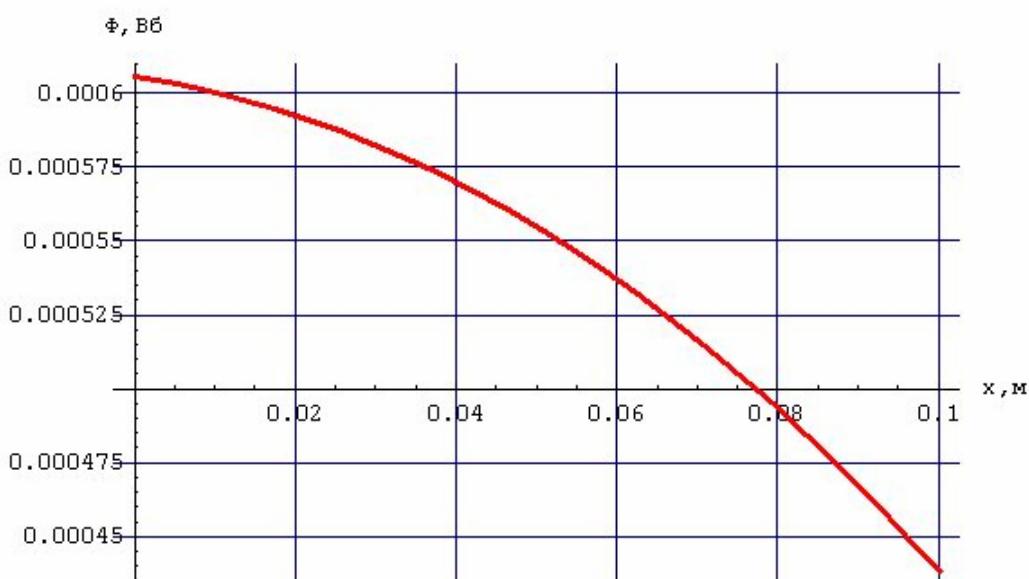


Рис. 3. Магнитный поток

Относительная погрешность вычисления в рассмотренном примере не превышает 0,01%.

Анализ современных средств математического моделирования позволяет сделать вывод о целесообразности использования программных средств систем компьютерной математики. Опыт практического моделирования показывает, что пакет программ Mathematica 4 обеспечивает разработку моделей электроинженерных и электрических аппаратов и протекающих в них процессов с приемлемой для инженерных расчетов погрешностью.

### Литература

1. Денисов К.М., Томасов В.С., Усольцев А.А. Использование компьютерных технологий в учебных курсах на кафедре электротехники и прецизионных электромеханических систем. / Современные образовательные технологии. Сб. статей под редакцией В.Н. Васильева, Ю.Н. Колесникова. СПбГИТМО(ТУ), 2000. С. 79–87.
2. Карлащук В.И. Электронная лаборатория на IBM PC. Программа Electronics Workbench и ее применение. М.: «СОЛООН - Р», 2001.
3. Дьяконов В.П. Mathematica 4 с пакетами приложений. М.: Нолидж, 2000.

# ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СКОРОСТЬЮ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ

## А.В. Гурьянов, В. В. Кротенко

Сформулирована методика синтеза цифровой системы управления скоростью двигателя постоянного тока с эталонной моделью при заданных периодах дискретности вычисления управления и частоте коммутации силовых ключей широтно-импульсного преобразователя.

Наиболее перспективными и практически применимыми на современном этапе являются двухэтапные методики синтеза цифровых систем управления с широтно-импульсными преобразователями (ШИП), ориентированные на ПЭВМ, при которых предварительный синтез осуществляется на основе приближенных эквивалентных моделей, а окончательный анализ с уточнением результатов предварительного синтеза производится на ПЭВМ с использованием имитационных моделей, достаточно точно отражающих как электромагнитные процессы в энергетической подсистеме с ШИП, так и дискретный характер сигналов в информационной подсистеме. Именно такая методика используется при синтезе рассматриваемой системы.

Прецизионные электроприводы строятся по широко распространенной схеме подчиненного регулирования координат на базе моментных исполнительных двигателей постоянного тока, питаемых от транзисторных ШИП. Как правило, позиционный электропривод содержит контуры регулирования тока, скорости и положения [1].

Быстродействие позиционного электропривода по управляющему воздействию в случае настройки его контура регулирования скорости на «оптимум по модулю» практически в два раза выше быстродействия электропривода, контур регулирования скорости которого построен по классической схеме с настройкой на «симметричный оптимум» [2, 3], однако первый при компенсации возмущений обладает, как правило, недовлетворительными по качеству переходными процессами. Сочетать показатели настроенных на «симметричный оптимум» систем при отработке ими возмущений с высоким быстродействием по управлению систем, настроенных на «оптимум по модулю», позволяют системы, построенные по схеме с эталонными моделями [4].

Задачей синтеза будем считать определение при заданных частоте коммутации силовых ключей ШИП  $T_k$  и периоде дискретности вычисления управления  $T_o$  параметров цифровых регуляторов, обеспечивающих в цифровом контуре регулирования скорости с эталонной моделью процессы, по характеру близкие к стандартным процессам в ее эквивалентной линейной модели.

Структурная схема системы изображена на рис. 1. Система содержит исполнительный ДПТ, силовой каскад СК, инерционный датчик скорости с коэффициентом передачи  $K_{dc}$  и постоянной времени  $T_{dc}$ , безынерционный датчик тока с коэффициентом передачи  $K_{dt}$ , реализованные на микроЭВМ эталонную модель ЦЭМ, цифровые регуляторы скорости ЦР<sub>1</sub>, ЦР<sub>2</sub> и тока ЦР<sub>3</sub>, а также широтно-импульсный модулятор ШИМ.

В представленной системе можно выделить основной и дополнительный контуры регулирования скорости и контур регулирования тока.

Основной контур регулирования системы включает ДПТ, усилитель мощности и цифровой регулятор ЦР<sub>1</sub>, с помощью которого формируются заданные динамические показатели системы по управляющему воздействию.

Дополнительный контур регулирования содержит эталонную модель ЦЭМ и цифровой регулятор ЦР<sub>2</sub>. В случае применения эталонной модели с динамическими характеристиками, идентичными характеристикам осинового контура регулирования, в системе сохраняются заданные динамические качества по управляющему воздействию,

при этом заданные динамические качества по возмущающему воздействию формируются независимо с помощью цифрового регулятора ЦР<sub>2</sub>.

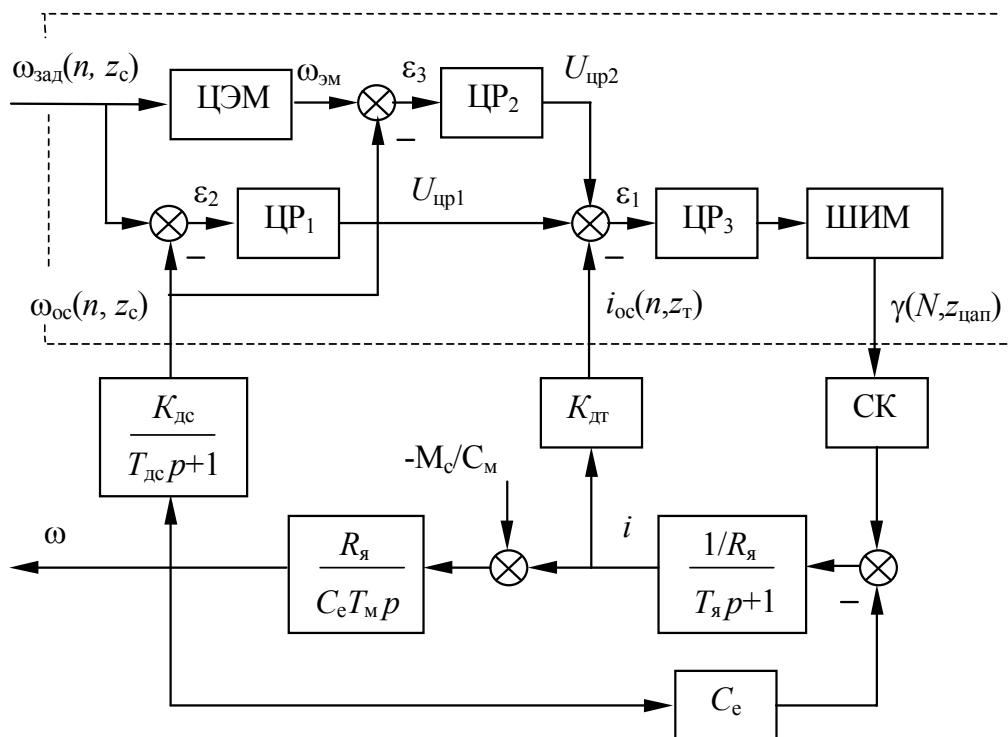


Рис. 2. Структурная схема цифровой системы регулирования скорости ДПТ с эталонной моделью

Синтез цифрового контура регулирования тока рассмотрен в [5], цифровой ПИ-регулятор тока, реализуемый на основании выражений

$$\varepsilon_1(n) = U_{\text{up1}}(n) + U_{\text{up2}}(n) - i_{\text{oc}}(n), \quad (1a)$$

$$U_{\text{TP}}(n) = \varepsilon_1(n) K_{\text{TP}},$$

(16)

$$U_{\text{ти1}}(n) = U_{\text{ти1}}(n-1) + K_{\text{ти}} \varepsilon_1(n-1),$$

(1B)

$$U_{\text{up3}}(n) = U_{\text{tp}}(n) + U_{\text{til1}}(n),$$

$U_{\text{up}1}(n)$ ,  $U_{\text{up}2}(n)$  – сигналы задания на входе контура регулирования тока;  $U_{\text{up}3}(n)$  –

выходной сигнал регулятора тока;  $K_{\text{тп}}$  и  $K_{\text{ти}}$  – коэффициенты передачи пропорционального и интегрального каналов регулятора тока, определяемые соответственно на основании выражений

$$K_{\text{пп}} = R_{\text{я}} (1 - \exp(-T_0 / T_{\text{т}})) / K_{\text{дт}} K_{\text{ст}} (1 - \exp(-T_0 / T_{\text{я}})), \quad (2a)$$

$$K_{\text{ти}} = R_{\text{я}} (1 - \exp(-T_{\text{o}} / T_{\text{р}})) / K_{\text{дт}} K_{\text{ст}}, \quad (26)$$

обеспечивает при отработке скачков задания переходные процессы, по характеру близкие к экспоненциальному процессу с постоянной времени  $T_t \geq T_o$ . На рис. 2 представлены предельные по быстродействию переходные процессы в контуре при  $T_k = T_t = 0.001$  с.

Оптимизация основного контура системы осуществляется с использованием эквивалентной модели со структурной схемой, изображенной на рис. 3. Настройку контура на «оптимум по модулю» обеспечивает регулятор П-типа [6], при этом в модели контур регулирования тока представлен звеном в виде апериодического звена первого порядка с постоянной времени  $T_t$  и коэффициентом передачи  $1/K_{dt}$ .

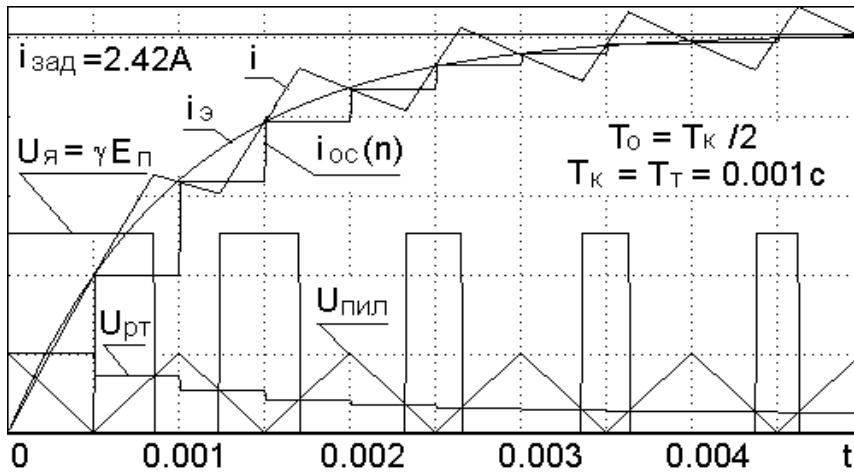


Рис. 2. Переходные процессы в контуре регулирования тока

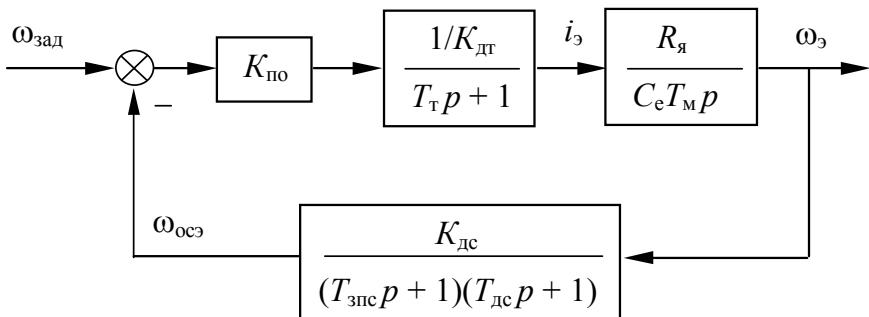


Рис. 3. Структурная схема ЭЛМ, используемая при оптимизации системы по управляемому воздействию

Малая некомпенсированная постоянная основного контура по управляемому воздействию  $T_{\mu u}$  определяется выражением

$$T_{\mu u} = T_t + T_{dc} + T_{зпс}, \quad (3)$$

где  $T_{зпс} = T_0/2$  – постоянная времени, учитывающая запаздывание, вносимое ЦР<sub>1</sub> П-типа. Выбор коэффициента передачи  $K_{po}$  на основании соотношения

$$K_{po} = T_m C_e K_{dt} / (2 T_{\mu u} R_я K_{dc}) \quad (4)$$

обеспечивает указанную настройку, передаточная функция основного контура эквивалентной модели характеризуется выражением

$$W(p) = \frac{\omega_{osz}(p)}{\omega_{зпд}(p)} = \frac{1}{2T_{\mu u}^2 p^2 + 2T_{\mu u} p + 1}. \quad (5)$$

Коэффициент передачи  $K_{п1}$  цифрового П-регулятора (ЦР<sub>1</sub>) определяется на основании выражения

$$K_{п1} = K_{po} = T_m C_e K_{dt} / (2 T_{\mu u} R_я K_{dc}). \quad (6)$$

На рис. 4 представлены переходные процессы в основном контуре цифровой системы регулирования скорости с ШИП и цифровой эталонной модели (соответственно кривые  $\omega$ ,  $\omega_0$ ) при отработке скачков задающего и возмущающего воздействий. При отработке задающего воздействия переходные процессы в основном контуре системы и ЦЭМ совпадают, при отработке возмущающего воздействия основной контур обладает статической ошибкой, в ЦЭМ такая ошибка отсутствует.

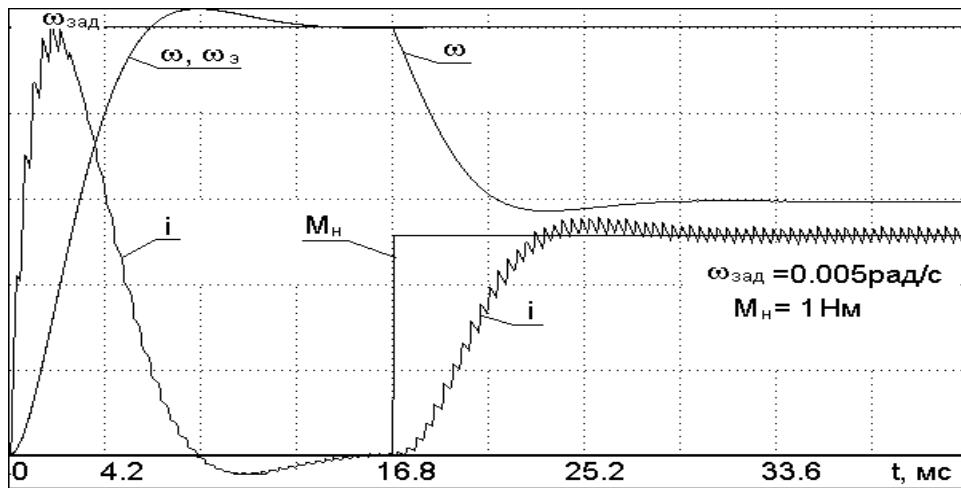


Рис. 4. Переходные процессы в основном контуре системы

Оптимизацию системы по возмущающему воздействию следует осуществлять с использованием полной эквивалентной линейной модели [6], структурная схема которой изображена на рис. 5,а. Полная ЭЛМ содержит объект управления, регулятор в виде последовательно включенных ПИ-регулятора с коэффициентами передачи  $K_p$  и  $K_i$  и двух ПД-регуляторов с временами упреждения  $T_{d1}$  и  $T_{d2}$ , три апериодических звена первого порядка с постоянными времени  $T_{\mu1}$ ,  $T_{\mu2}$ ,  $T_{\text{зпс}}$ , учитывающими неполную компенсацию ЦР2 постоянных  $T_t$ ,  $T_{dc}$  и вносимое им запаздывание.

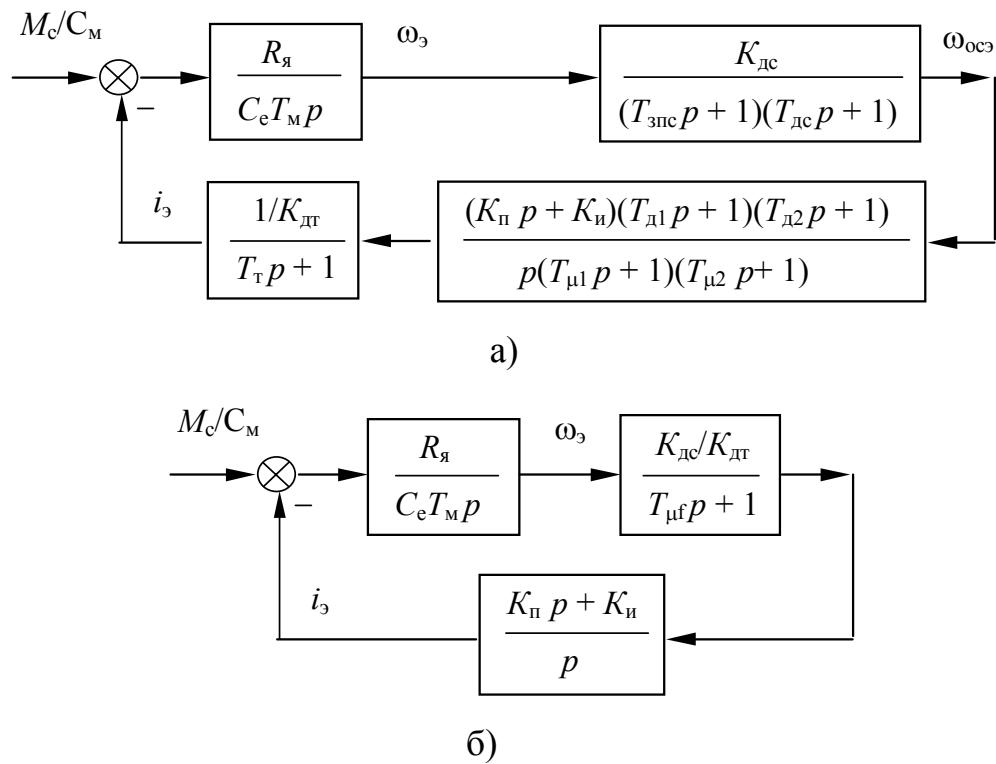


Рис. 5. Структурные схемы ЭЛМ, используемые при оптимизации системы по возмущающему воздействию

Расчетная эквивалентная линейная модель представлена структурной схемой, изображенной на рис. 5,б, ее настройка на «симметричный оптимум» осуществляется в случае выбора коэффициентов передачи  $K_p$  и  $K_i$  ПИ-регулятора на основании соотношений

$$K_{\pi} = T_m C_e K_{dt} / (2 T_{\mu f} R_y K_{dc}), \quad (7)$$

$$K_i = K_{\pi} / T_i = T_m C_e K_{dt} / (8 T_{\mu f}^2 R_y K_{dc}), \quad (8)$$

передаточная функция эквивалентной модели по возмущающему воздействию характеризуется выражением

$$W(p) = \frac{i(p)}{M_{3AD}(p)} = \frac{(4T_{\mu f} p + 1) / C_m}{8T_{\mu f}^3 p^3 + 8T_{\mu f}^2 p^2 + 4T_{\mu f} p + 1},$$

где  $T_{\mu f}$  – малая некомпенсированная постоянная времени системы по возмущающему воздействию.

В табл.1 представлены типы регуляторов, применяемых при оптимизации ЭЛМ по возмущающему воздействию, и соответствующие им постоянные времени  $T_{\mu f}$ .

Таблица 1

Тип АР	Компенсируемая постоянная	Параметры АР	Малая некомпенсированная постоянная $T_{\mu f}$ ЭЛМ
И	-	$K_{\pi}=0, K_i \neq 0,$ $T_{d1}=0, T_{\mu 1}=0,$ $T_{d2}=0, T_{\mu 2}=0.$	$T_{\mu f}=T_t+T_{dc}+T_{3pc}=$ $=T_t+T_{dc}+T_0/2. \quad (9)$
ПИ-ПД	$T_t$	$K_{\pi} \neq 0, K_i \neq 0,$ $T_{d1}=T_t, T_{\mu 1}=T_0/2,$ $T_{d2}=0, T_{\mu 2}=0.$	$T_{\mu f}=T_{\mu 1}+T_{dc}+T_{3pc}=$ $=T_{dc}+T_0. \quad (10)$
ПИ-ПД-ПД	$T_t, T_{dc}$	$K_{\pi} \neq 0, K_i \neq 0,$ $T_{d1}=T_t, T_{\mu 1}=T_0/2,$ $T_{d2}=T_{dc}, T_{\mu 2}=T_0/2.$	$T_{\mu f}=T_{\mu 1}+T_{\mu 2}+T_{3pc}=$ $=1.5T_0. \quad (11)$

Если в режиме парирования возмущений не осуществляется компенсация постоянных  $T_t$  и  $T_{dc}$ , то в этом случае достаточно применения в качестве АР<sub>2</sub> И-регулятора с передаточной функцией  $W(p)=K_i/p$  и коэффициентом передачи  $K_i$ , определяемым на основании (8). Коэффициент передачи  $K_{i2}$  ЦР<sub>2</sub> И-типа с учетом выражения (8) определяется на основании выражения

$$K_{i2} = T_o K_i = T_o T_m C_e K_{dt} / (8(T_t+T_{dc}+T_o/2)^2 R_y K_{dc}), \quad (12)$$

при этом малая некомпенсированная постоянная времени  $T_{\mu f}$  определяется на основании выражения (9).

На рис. 6 представлены переходные процессы в цифровой системе регулирования скорости с ЦР<sub>2</sub> И-типа. Ее быстродействие по управляемому воздействию в два раза выше быстродействия рассмотренной в [2, 3] классической системы подчиненного регулирования скорости ДПТ, настроенной на «симметричный оптимум», по возмущающему воздействию быстродействие обеих систем одинаково.

Увеличить быстродействие системы в режиме парирования возмущений можно при использовании в качестве ЦР<sub>2</sub> регуляторов, осуществляющих компенсацию либо одной постоянной  $T_t$ , либо двух постоянных  $T_t$  и  $T_{dc}$ . В случае компенсации одной постоянной  $T_t$  достаточно применения ПИ-ПД-регулятора, в случае компенсации двух постоянных  $T_t$  и  $T_{dc}$ , необходимо применение ПИ-ПД-ПД-регулятора.

Аналоговый ПИ-ПД-ПД-регулятор полной ЭЛМ может быть преобразован в эквивалентный регулятор с разделенными каналами на основании выражения

$$W(p) = (K_{\pi}+K_i/p)(T_{d1}p+1)(T_{d2}p+1) = K_{\pi d2}p^2+K_{\pi d1}p+K_{\pi p}+K_{\pi i}/p, \quad (13)$$

где

$$K_{\pi d2} = K_{\pi} T_{d1} T_{d2}, \quad (14)$$

$$K_{\pi d1} = K_{\pi} (T_{d1} + T_{d2}) + K_i T_{d1} T_{d2}, \quad (15)$$

$$K_{\pi p} = K_{\pi} + K_i (T_{d1} + T_{d2}), \quad (16)$$

$$K_{\pi i} = K_i. \quad (17)$$

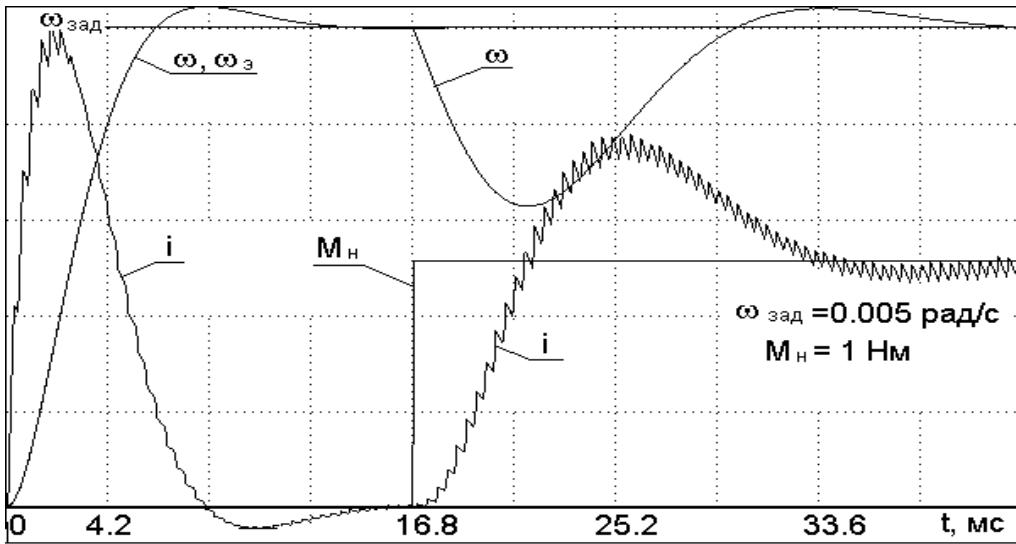


Рис. 6. Переходные процессы в системе с эталонной моделью и ЦР<sub>2</sub> И-типа

Реализация ЦР<sub>1</sub> и ЦР<sub>2</sub>, в случае выполнения последнего по схеме с разделенными каналами со структурой, соответствующей структуре АР (13), осуществляется на основании выражений

$$\varepsilon_2(n) = \omega_{\text{зад}}(n) - \omega_{\text{oc}}(n), \quad (18a)$$

$$U_{\text{цр1}}(n) = K_{\text{п1}} \varepsilon_2(n), \quad (18b)$$

$$\varepsilon_3(n) = \omega_{\text{эм}}(n) - \omega_{\text{oc}}(n), \quad (18c)$$

$$U_{\text{п2}}(n) = K_{\text{п2}} \varepsilon_3(n), \quad (18d)$$

$$U_{\text{и2}}(n) = U_{\text{и2}}(n-1) + K_{\text{и2}} \varepsilon_3(n-1), \quad (18e)$$

$$U_{\text{и2т}}(n) = U_{\text{и2}}(n) + 0.5 K_{\text{и2}} \varepsilon_3(n), \quad (18f)$$

$$U_{\text{д21}}(n) = K_{\text{д21}} (\varepsilon_3(n) - \varepsilon_3(n-1)), \quad (18g)$$

$$U_{\text{д22}}(n) = K_{\text{д22}} (\varepsilon_3(n) - 2 \varepsilon_3(n-1) + \varepsilon_3(n-2)), \quad (18h)$$

$$U_{\text{цр2}}(n) = U_{\text{п2}}(n) + U_{\text{и2т}}(n) + U_{\text{д21}}(n) + U_{\text{д22}}(n), \quad (18i)$$

где  $U_{\text{цр1}}(n)$ ,  $U_{\text{цр2}}(n)$  – выходные сигналы ЦР<sub>1</sub> и ЦР<sub>2</sub>;  $U_{\text{п2}}(n)$ ,  $U_{\text{и2т}}(n)$ ,  $U_{\text{д21}}(n)$ ,  $U_{\text{д22}}(n)$ ,  $K_{\text{п2}}$ ,  $K_{\text{и2}}$ ,  $K_{\text{д21}}$ ,  $K_{\text{д22}}$  – сигналы П-, И- и Д-каналов ЦР<sub>2</sub> и их коэффициенты передачи, соответственно;  $\omega_{\text{эм}}(n)$  – выходной сигнал ЦЭМ.

Расчет коэффициентов передачи ЦР<sub>2</sub>  $K_{\text{п2}}$ ,  $K_{\text{и2}}$ ,  $K_{\text{д21}}$  и  $K_{\text{д22}}$  следует осуществлять с учетом соотношений (14)–(17) на основании выражений

$$K_{\text{п2}} = K_{\text{эп}} - K_{\text{п0}} = K_{\text{п}} + K_{\text{и}} (T_{\text{д1}} + T_{\text{д2}}) - K_{\text{п0}}, \quad (19)$$

$$K_{\text{и2}} = T_0 K_{\text{эи}} = T_0 K_{\text{и}}, \quad (20)$$

$$K_{\text{д21}} = K_{\text{эд1}} / T_0 = (K_{\text{п}} (T_{\text{д1}} + T_{\text{д2}}) + K_{\text{и}} T_{\text{д1}} T_{\text{д2}}) / T_0, \quad (21)$$

$$K_{\text{д22}} = K_{\text{эд2}} / T_0^2 = K_{\text{п}} T_{\text{д1}} T_{\text{д2}} / T_0^2. \quad (22)$$

На рис. 7,а представлены переходные процессы в цифровой системе регулирования скорости с ЦР<sub>2</sub> ПИ-ПД-типа, на рис. 7,б – с ЦР<sub>2</sub> ПИ-ПД-ПД-типа. Быстродействие систем в режиме парирования возмущения характеризуется малыми некомпенсированными постоянными времени, определяемыми, соответственно, выражениями (10) и (11). В последнем случае быстродействие максимально и может быть увеличено лишь за счет уменьшения периода дискретности  $T_0$ . Рассмотренная система относится к классу беспоисковых самонастраивающихся систем с эталонной моделью, в ней при изменении параметров объекта управления обеспечиваются процессы, близкие по характеру к процессам в эталонной модели, при этом ее адаптационные свойства улучшаются с ростом коэффициента передачи цифрового регулятора ЦР<sub>2</sub> [4].

На рис. 7,в представлены переходные процессы в цифровой системе регулирования скорости с ЦР<sub>2</sub> ПИ-ПД-ПД-типа при суммарном моменте инерции ДПТ с нагрузз-

кой, трехкратно превышающем расчетный, период дискретности  $T_o$  в рассматриваемом случае составлял величину  $T_o=0.0001$  с.

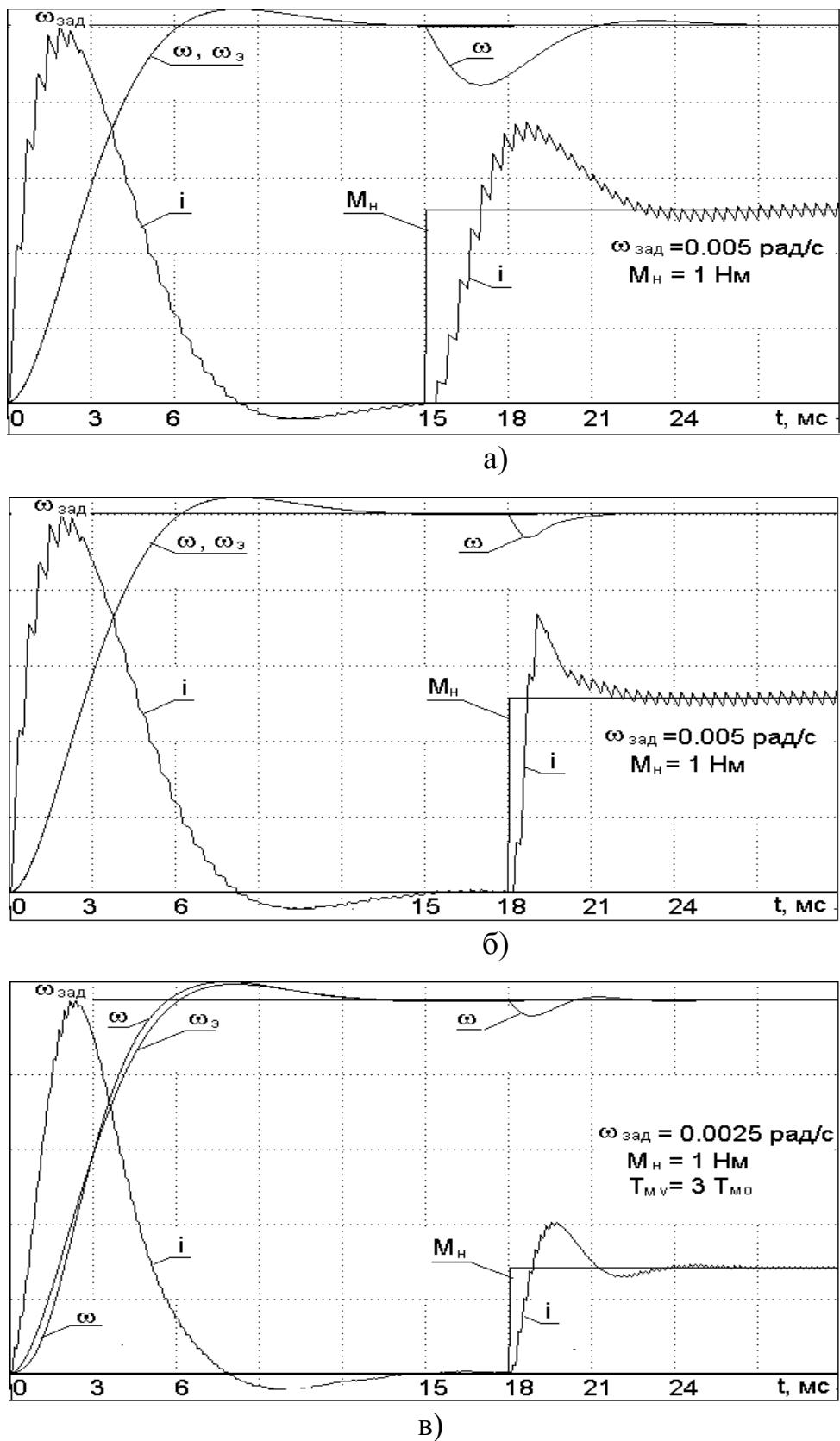


Рис. 7. Переходные процессы в системе регулирования скорости с эталонной моделью с ЦР<sub>2</sub> ПИ-ПД-типа (а) и ПИ-ПД-ПД-типа (б,в).

ЦЭМ настроенной на «оптимум по модулю» системы может быть построена на основании структурной схемы, представленной на рис.8,а, ее расчет осуществляется на основании выражений

$$\varepsilon_1(n) = x_{\text{зад}}(n) - U_{\text{ЭМ}}(n), \quad (23\text{a})$$

$$\varepsilon_2(n) = \varepsilon_1(n) - U_{\text{oc}}(n-1), \quad (23\text{b})$$

$$U_{\text{и1}}(n) = U_{\text{и1}}(n-1) + K_{\text{и1}}(n) \varepsilon_2(n), \quad (23\text{в})$$

$$U_{\text{oc}}(n) = U_{\text{и1}}(n), \quad (23\text{г})$$

$$U_{\text{c}}(n) = (U_{\text{и1}}(n-1) + U_{\text{и1}}(n))/2, \quad (23\text{д})$$

$$U_{\text{и2}}(n) = U_{\text{и2}}(n-1) + K_{\text{и2}} U_{\text{c}}(n-1), \quad (23\text{е})$$

$$U_{\text{и2т}}(n) = U_{\text{и2}}(n) + 0.5 K_{\text{и2}} U_{\text{c}}(n), \quad (23\text{ж})$$

$$U_{\text{ЭМ}}(n) = U_{\text{и2т}}(n), \quad (23\text{з})$$

где  $x_{\text{зад}}(n)$  – сигнал задания на входе ЦЭМ,  $\varepsilon_1(n)$  и  $\varepsilon_2(n)$  – сигналы рассогласования,  $U_{\text{и1}}(n)$  и  $U_{\text{и2т}}(n)$  – выходные сигналы интеграторов,  $U_{\text{ЭМ}}(n)$  – выходной сигнал ЦЭМ.

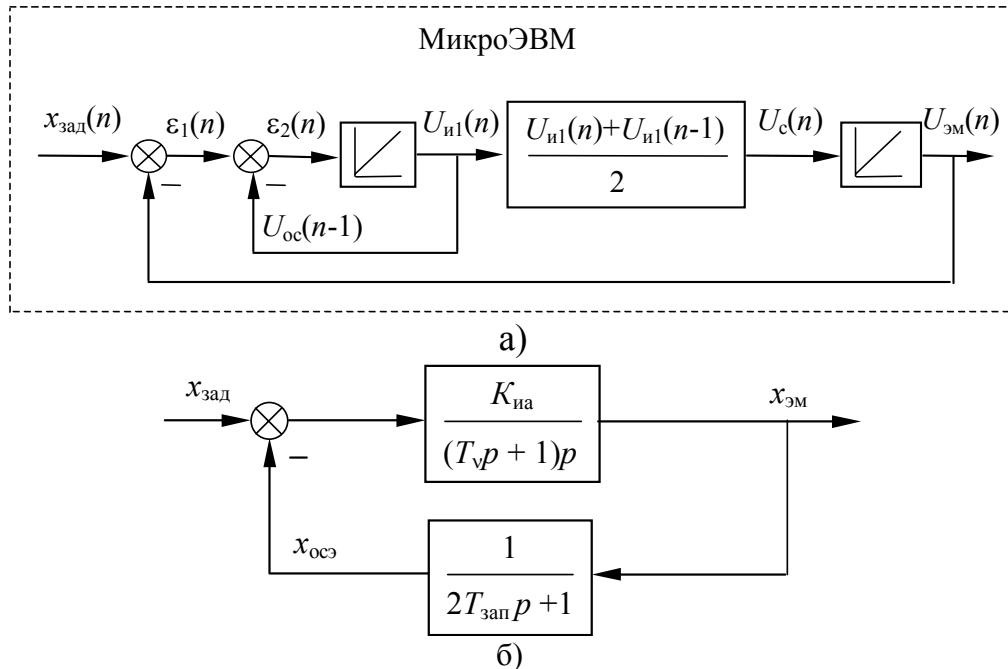


Рис. 8. Структурные схемы эталонной цифровой модели системы, настроенной на «оптимум по модулю» (а), и ее эквивалентной линейной модели (б)

ЦЭМ может быть поставлена в соответствие расчетная эквивалентная линейная модель со структурной схемой, представленной на рис.8,б. Модель содержит интегрирующее звено с коэффициентом передачи  $K_{\text{иа}}$ , и два апериодических звена первого порядка с единичными коэффициентами передачи и постоянными времени  $T_{\text{в}}$  и  $2T_{\text{зап}}$ , последнее учитывает вносимое двумя интеграторами цифровой модели запаздывание. Оптимизация линейной эквивалентной модели осуществляется с использованием расчетной эквивалентной модели, получаемой путем замены двух апериодических звеньев с постоянными  $T_{\text{в}}$  и  $2T_{\text{зап}}$  одним звеном с малой некомпенсированной постоянной  $T_{\mu}$ , равной

$$T_{\mu} = T_{\text{в}} + 2T_{\text{зап}}. \quad (24)$$

Выбор коэффициента передачи  $K_{\text{иа}}$  интегрирующего звена на основании соотношения

$$K_{\text{иа}} = 1 / 2 T_{\mu} \quad (25)$$

обеспечивает в расчетной эквивалентной модели настройку на «оптимум по модулю». В случае реализации цифровых интеграторов на основании выражений (23в) и (23,е,ж) постоянная  $T_{\text{зап}}$  определяется на основании соотношения  $T_{\text{зап}} = T_{\text{o}} / 2$ .

Выбор коэффициента передачи  $K_{i1}$  осуществляется на основании выражения  

$$K_{i1} = 1 - \exp(-T_o / T_v), \quad (26)$$

в этом случае интегратор, охваченный отрицательной обратной связью, обладает динамическими характеристиками, близкими к характеристикам апериодического звена первого порядка с постоянной времени  $T_v$ . Расчет коэффициента передачи  $K_{i2}$  может быть осуществлен с учетом (25) на основании выражений

$$K_{i2} = T_o / 2 (T_v + T_o). \quad (27)$$

На рис. 9 представлены переходные процессы в эталонной цифровой модели системы  $x_{\text{эм}}(n)$  и ее эквивалентной линейной модели  $x_{\text{эм}}(t)$  при отработке скачка задающего воздействия.

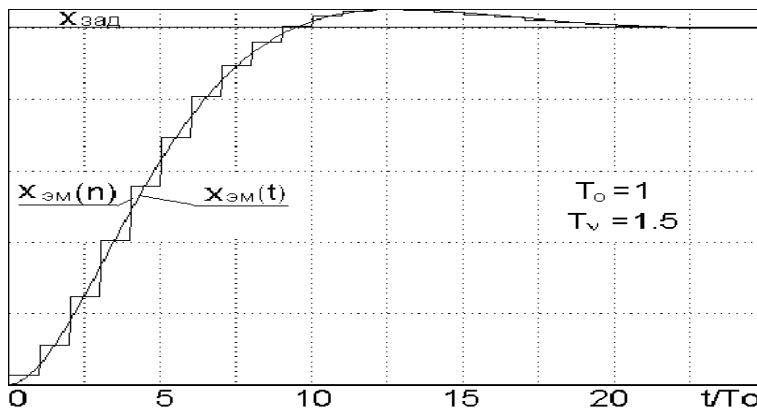


Рис. 9. Графики переходных процессов в эталонной цифровой модели системы с настройкой на «оптимум по модулю»

Параметры ДПТ и исходные данные для расчета системы представлены в табл.2.

Таблица 2

Двигатель постоянного тока типа ДПМ-160-7-Д09	
Максимальное напряжение питания $E_{\text{п}}$ , В	60
Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ , Ом	6
Номинальный ток $I_{\text{ном}}$ , А	4
Номинальный момент $M_{\text{ном}}$ , Нм	7
Электрическая постоянная цепи якоря $T_{\text{я}}$ , мс	5
Механическая постоянная суммарная $T_{\text{м}}$ , мс	50
Скорость холостого хода $\omega_{\text{хх}}$ , рад/с	0.56
Постоянная по моменту, $C_{\text{м}}$ , Нм/А	1.75
Постоянная по противоЭДС $C_{\text{e}}$ , Вс/рад	107.14
Транзисторный ШИП с управлением, осуществляющим изменение длительности импульса дважды на периоде коммутации $T_k$	
Период коммутации цепи якоря $T_k$ , мс	0.4
Период дискретности $T_o$ , мс	0.2
Стат. коэффициент передачи ШИП $K_{\text{ст}}$ ,	6
Эквивалентная постоянная контура тока $T_t$ , мс	1
Коэф. передачи датчика тока $K_{\text{дт}}$ , В/А	1
Коэф. передачи датчика скорости $K_{\text{дс}}$ , Вс/рад	17.857
Постоянная времени датчика скорости $T_{\text{дс}}$ , мс	0.5

Приведенные результаты имитационного моделирования системы подтверждают корректность предлагаемой методики синтеза цифровых систем управления с эталонными моделями и широтно-импульсными преобразователями.

## Литература

1. Шрейнер Р.Т. Системы подчиненного регулирования электроприводов. Часть 1. Электроприводы постоянного тока с подчиненным регулированием координат. Екатеринбург, 1997.
2. Кротенко В.В. Параметрический синтез и анализ цифровой системы управления прецизионного электропривода лидарной станции. Научно-технический вестник СПБИТМО. Выпуск 11, С.86-96, СПб , 2003.
3. Кротенко В.В., Толмачев В.А., Томасов В.С., Синицин В.А. Синтез микропроцессорной системы управления электропривода опорно-поворотного устройства. // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т.47. №11. С.23–30.
4. Солодовников В.В., Шрамко Л.С. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями. М.: Машиностроение, 1972.
5. Гурьянов В.А., Кротенко В.В. Цифровая система управления источника тока, построенного на основе транзисторного ШИП. / Научно-технический вестник СПБИТМО. Выпуск 3. СПб , 2001. С.120–125.
6. Кротенко В.В. Параметрический синтез цифровых систем управления с транзисторными широтно-импульсными преобразователями. // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т.46. №6. С.25–31.

# ЦИФРОВАЯ АДАПТИВНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ИСТОЧНИКА ТОКА, ПОСТРОЕННОГО НА ОСНОВЕ ТРАНЗИСТОРНОГО ШИП

В.В. Кротенко

Предложен подход к синтезу адаптивной цифровой системы управления источника тока с транзисторным широтно-импульсным преобразователем и индуктивным сглаживающим фильтром в нагрузке. Показана целесообразность применения комбинированного сигнально-параметрического принципа адаптации для расширения возможностей самонастройки в условиях ограничения частоты коммутации силовых ключей ШИП и повышения требований к быстродействию системы.

Структурная схема системы регулирования тока представлена на рис. 1,а. Система включает в себя реверсивный транзисторный ШИП, силовой каскад (СК) которого построен по мостовой схеме на силовых ключах КЛ1–КЛ4, нагрузку активно-индуктивного характера с сопротивлением  $R_h$ , индуктивностью  $L_h$  и постоянной времени нагрузки  $T_h = L_h / R_h$ , безынерционный датчик тока с коэффициентом передачи  $K_{dt}$ , состоящий из первичного датчика в виде шунта (Ш) и устройства гальванической развязки с усилителем (УГР), и реализованные на микроЭВМ цифровой регулятор (ЦР) и широтно-импульсный модулятор (ШИМ) преобразователя. В системе вычисление управления осуществляется в дискретные моменты времени  $n=t/T_0$ , коммутация нагрузки – в моменты  $N=t / T_k$ .

В случае бесконечно большой разрядности  $Z_{апп}$  и  $Z_{цап}$ , применения в качестве ЦР ПИ-регулятора, построенного по схеме с разделенными каналами, и представления нагрузки в виде апериодического звена первого порядка система регулирования тока может быть представлена структурной схемой, изображенной на рис. 1,б.

В настоящее время в зависимости от типа транзистора силового ключа ШИП частоту коммутации последнего приходится ограничивать на уровне 5–30 кГц. Эта частота, как и род реализуемой широтно-импульсной модуляции, ограничивают предельные динамические возможности цифровой системы.

Задача синтеза – определение при заданных периоде коммутации силовых ключей ШИП  $T_k$  и периоде дискретности вычисления управления  $T_0$  параметров цифровых регуляторов, обеспечивающих в цифровой системе процессы, по характеру близкие к эталонным процессам в ее эквивалентной линейной модели с передаточной функцией (1) в виде апериодического звена первого порядка с постоянной времени  $T_t$

$$W_3(p) = i_3(p) / i_{зад}(p) = 1/(T_t p + 1). \quad (1)$$

Полагаем, что цифровой широтно-импульсный модулятор осуществляет коммутацию ключей с постоянным периодом  $T_k$  по несимметричному закону и обеспечивает двухстороннюю модуляцию фронтов импульса при симметричном расположении выходного импульса преобразователя в статическом режиме относительно середины периода коммутации  $T_k$ . В зависимости от соотношения периода дискретности  $T_0$  и периода коммутации  $T_k$  могут иметь место следующие виды широтно-импульсной модуляции:

- модуляция ШИМ1-1 с одним вычислением управления на периоде коммутации  $T_0 = T_k$ ,
- модуляция ШИМ1-2 с двумя вычислениями управления на периоде коммутации  $T_0 = T_k/2$ ,
- модуляция ШИМ2, которая при  $T_0 \ll T_k$  по характеру соответствует используемой в аналоговых системах модуляции второго рода.

Среднее напряжение на нагрузке  $U_{cp}(N)$  при ее включении в цепь источника питания на время  $t_1(N)$  на  $N$ -ном периоде коммутации  $T_k$  в статическом режиме работы ШИП не зависит от вида и глубины модуляции и может быть определено на основании выражения

$$U_{cp}(N) = E_{\pi} \cdot t_1(N) / T_k = E_{\pi} \gamma(N, Z_{cap}),$$

где  $\gamma(N, Z_{cap}) = t_1(N)/T_k$  – относительная продолжительность включения нагрузки в цепь источника питания  $E_{\pi}$ ,  $Z_{cap}$  – эквивалентная разрядность ЦАП, обусловленная дискретностью формирования интервала времени  $t_1(N)$ .

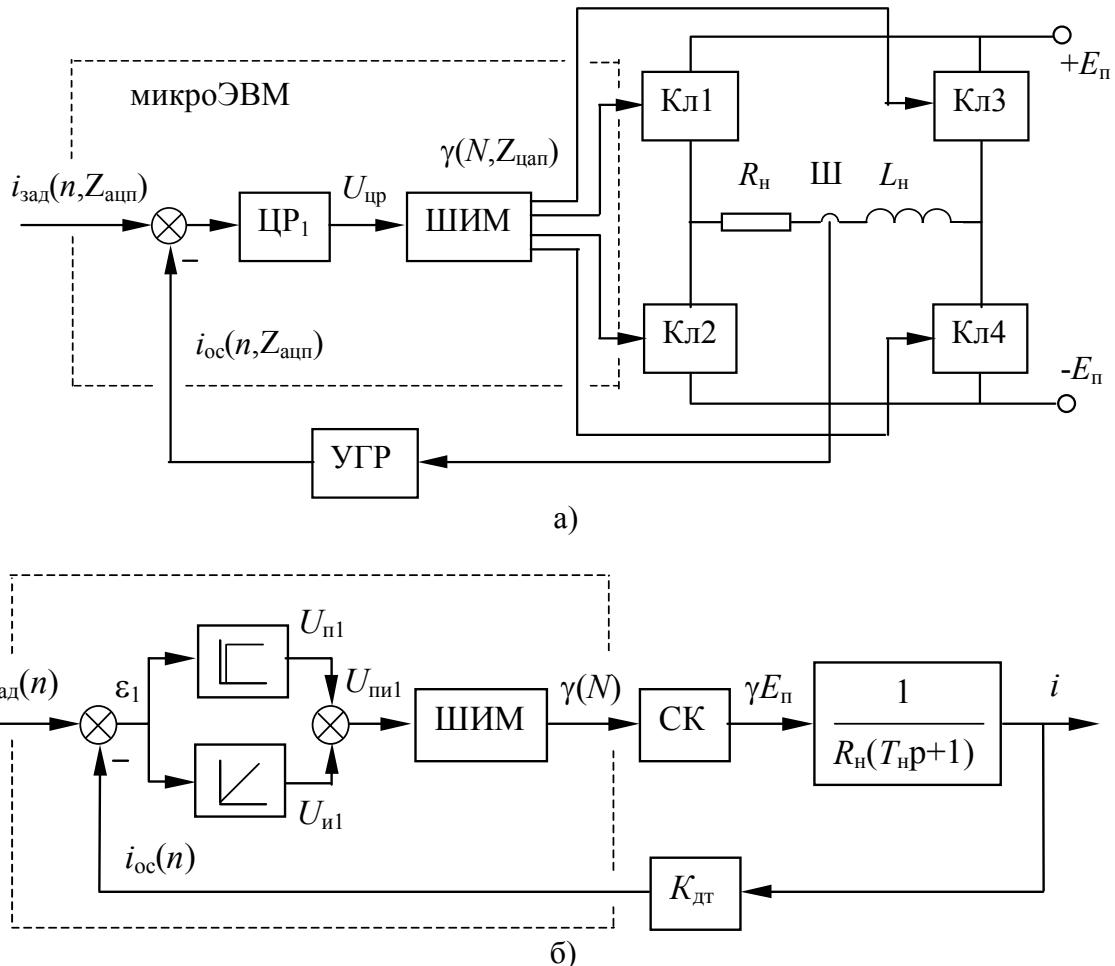


Рис.1. Структурные схемы цифровой системы регулирования тока, построенной на основе реверсивного транзисторного ШИП

Если при уровне входного сигнала модулятора  $U_{\text{пр}}$ , равном максимальному значению его опорного пилообразного сигнала  $U_o$ , относительная продолжительность включения нагрузки в цепь источника питания  $\gamma(N, Z_{cap})$  равна единице, то среднее за период  $T_k$  напряжение на нагрузке максимально и составляет величину  $U_{cp}(N)=E_{\pi}$ , при этом статический коэффициент передачи  $K_{ct}$  транзисторного ШИП на линейном участке его статической характеристики определяется выражением

$$K_{ct} = E_{\pi} / U_o, \quad (2)$$

при превышении сигналом  $U_{\text{пр}}$  уровня  $U_o$  напряжение на нагрузке остается неизменным, величиной  $E_{\pi}$ , и говорится о выходе ШИП в насыщение.

Импульсный характер управления обуславливает наличие пульсаций тока в нагрузке и обеспечение их заданного уровня является одним из важнейших требований к системе управления источника тока с ШИП.

В квазистатическом режиме работы системы амплитуда пульсаций тока  $\Delta I$  в активно-индуктивной нагрузке с параметрами  $R_h$ ,  $L_h$ ,  $T_h$ , не зависит от вида и глубины модуляции и определяется для  $T_k < T_h$  выражением

$$\Delta I = I_{k3} \gamma (1-\gamma) T_k / T_h, \quad (3)$$

где  $I_{k3} = E_n / R_h$  – ток короткого замыкания в нагрузке.

Синтез цифровой системы регулирования тока с цифровым модулятором, реализующим модуляцию ШИМ1-1 или ШИМ1-2, рассмотрен в [1]. В случае реализации цифрового ПИ-регулятора тока согласно выражениям

$$U_{n1}(n) = \varepsilon_1(n) K_{n1} = (i_{\text{зад}}(n) - i_{\text{oc}}(n)) K_{n1}, \quad (4a)$$

$$U_{i1}(n) = U_{i1}(n-1) + K_{i1} \varepsilon_1(n-1), \quad (4b)$$

$$U_{\text{пн1}}(n) = U_{n1}(n) + U_{i1}(n), \quad (4b)$$

и при выборе коэффициентов передачи  $K_{n1}$  и  $K_{i1}$  его пропорционального и интегрального каналов на основании выражений

$$K_{n1} = R_h (1 - \exp(-T_o / T_t)) / K_{\text{дт}} K_{\text{ст}} (1 - \exp(-T_o / T_h)), \quad (5a)$$

$$K_{i1} = R_h (1 - \exp(-T_o / T_t)) / K_{\text{дт}} K_{\text{ст}}, \quad (5b)$$

в системе обеспечиваются при отработке скачков задания переходные процессы, по характеру близкие к эталонному экспоненциальному процессу  $i_o(t)$  с постоянной времени  $T_t$  в эквивалентной линейной модели (1) при выполнении условия

$$T_o \leq T_t. \quad (6)$$

В случае построения цифровой системы регулирования тока с цифровым модулятором, реализующим ШИМ-2, при выполнении условия

$$T_o \ll T_k \leq T_t \quad (7)$$

динамические характеристики цифровой системы не отличаются от характеристик аналоговой системы с ПИ-регулятором и ШИМ-2, если выбор коэффициентов передачи  $K_{n1}$  и  $K_{i1}$  регулятора (4) осуществляется на основании соотношений

$$K_{n1} = T_h R_h / T_t K_{\text{ст}} K_{\text{дт}}, \quad (8a)$$

$$K_{i1} = T_o R_h / T_t K_{\text{ст}} K_{\text{дт}}. \quad (8b)$$

На рис. 2, а–в представлены переходные характеристики предельной по быстродействию системы при периоде коммутации  $T_k = T_t$  для периодов дискретности  $T_o$ , соответственно равных  $T_o = T_k$ ,  $T_o = T_k / 2$  и  $T_o = T_k / 10$ . Параметры объекта управления, ШИП и цифровых регуляторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры объекта управления	
Максимальное напряжение питания $E_n$ , В	50
Сопротивление нагрузки $R_h$ , Ом	0.25
Индуктивность нагрузки $L_h$ , Гн	0.001
Электрическая постоянная времени нагрузки $T_h$ , мс	0.004
Ток короткого замыкания ШИП $I_{k3}$ , А	200
Максимальный ток задания $I_{\text{зад max}}$ , А	50
Контур регулирования тока с транзисторным ШИП	
Период коммутации цепи якоря $T_k$ , мс	1
Период дискретности $T_o$ , мс	1; 0.5; 0.1
Эквивалентная постоянная контура $T_t$ , мс	1
Коэф. передачи датчика тока $K_{\text{дт}}$ , В/А	0.2
Стат. коэффициент передачи ШИП $K_{\text{ст}}$ ,	5
Коэф. передачи $K_n$ при $T_o = T_k$ ,	0.7142
Коэф. передачи $K_i$ при $T_o = T_k$ ,	0.158
Коэф. передачи $K_n$ при $T_o = T_k/2$ ,	0.834
Коэф. передачи $K_i$ при $T_o = T_k/2$ ,	0.098
Коэф. передачи $K_n$ при $T_o = T_k/10$ ,	0.964
Коэф. передачи $K_i$ при $T_o = T_k/10$ .	0.024

Анализ процессов показывает, что в цифровой системе регулирования тока с ШИП с модуляцией типа ШИМ1 или ШИМ2 процессы носят экспоненциальный харак-

тер, отличаясь лишь пульсациями от эталонного процесса  $i_0(t)$  в эквивалентной линейной модели с передаточной функцией вида (1).

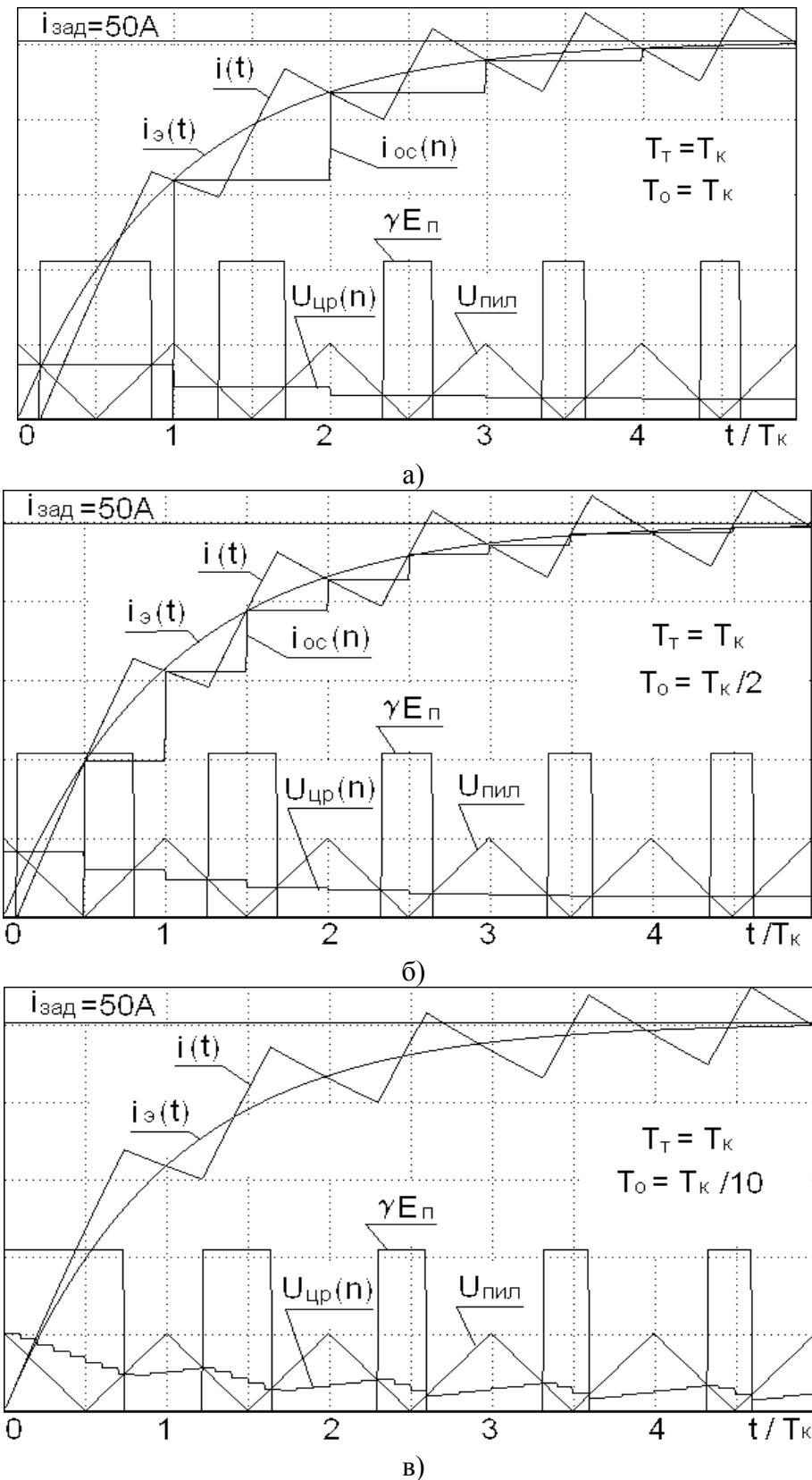


Рис. 2. Переходные процессы в цифровой системе с ШИМ1-1 (а), ШИМ1-2 (б) и ШИМ-2 (в)

При условии  
 $T_k > T_T$  (9)

переходные процессы по характеру приближаются к процессам конечной длительности, в этом случае цифровой системе регулирования тока с ШИП не может быть поставлена в соответствие эквивалентная линейная модель (1).

Рассмотренная система регулирования тока обеспечивает заданное качество переходных процессов при полном соответствии реальных параметров объекта  $R_{hv}$ ,  $L_{hv}$ ,  $E_{nv}$  их расчетным значениям  $R_h$ ,  $L_h$ ,  $E_n$ . В случае, когда имеет место временная и температурная нестабильность параметров объекта, динамические характеристики системы будут отличаться от заданных. Уменьшение влияния указанных факторов достигается путем применения адаптивного управления, причем наиболее перспективными при выполнении условия  $T_o \ll T_t$  являются беспоисковые самонастраивающиеся системы с эталонной моделью и сигнальной настройкой, простые в реализации и обладающие высоким быстродействием [3].

На рис. 3 представлена структурная схема такой системы. Она получена путем дополнения рассмотренной выше системы регулирования тока (основного контура) контуром адаптации, включающим в себя реализованные на микроЭВМ эталонную модель (ЭМ) и цифровой регулятор ЦР<sub>2</sub>, на вход которого поступает разность выходного сигнала ЭМ  $i_{\text{ЭМ}}(n)$  и сигнала обратной связи  $i_{\text{oc}}(n)$ . Выходной сигнал регулятора ЦР<sub>2</sub>, суммируясь с выходным сигналом ЦР<sub>1</sub> основного контура, поступает на вход ШИП и используется для компенсации отклонений динамических характеристик основного контура от задаваемых ЭМ. При достаточно большом коэффициенте передачи регулятора ЦР<sub>2</sub> динамические свойства системы определяются динамическими свойствами ЭМ [3]. Синтез адаптивной системы при динамических свойствах ЭМ, соответствующих динамическим характеристикам эквивалентной модели (1), сводится к выбору регулятора ЦР<sub>2</sub> с максимально возможным коэффициентом передачи, обеспечивающим устойчивость системы во всем диапазоне изменения параметров объекта  $R_{hv}$ ,  $L_{hv}$ ,  $E_{nv}$ .

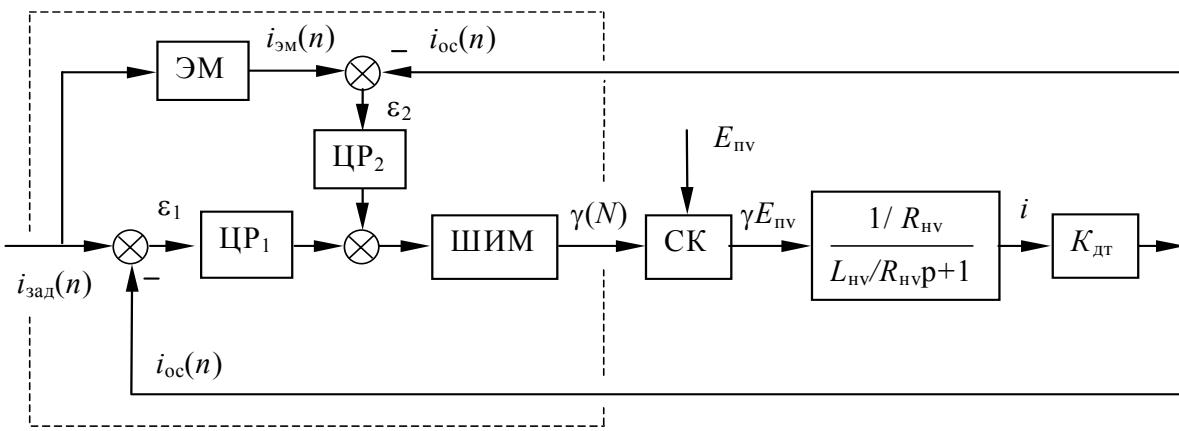


Рис. 3. Структурная схема беспоисковой самонастраивающейся системы регулирования тока с эталонной моделью и сигнальной настройкой

В случае применения в качестве ЦР<sub>2</sub> ПИ-регулятора, построения его по схеме с разделенными каналами и реализации его согласно выражениям

$$U_{\text{п2}}(n) = \varepsilon_2(n) K_{\text{п2}} = (i_{\text{ЭМ}}(n) - i_{\text{oc}}(n)) K_{\text{п2}}, \quad (10a)$$

$$U_{\text{и2}}(n) = U_{\text{п2}}(n-1) + K_{\text{и2}} \varepsilon_2(n-1), \quad (10b)$$

$$U_{\text{п2и2}}(n) = U_{\text{п2}}(n) + U_{\text{и2}}(n), \quad (10b)$$

максимальные значения коэффициентов передачи  $K_{\text{п2}}$  и  $K_{\text{и2}}$  пропорционального и интегрального каналов определяются на основании выражений

$$K_{\text{п2}} = K_{\text{п пред}} - K_{\text{п1}}, \quad (11a)$$

$$K_{\text{и2}} = K_{\text{и пред}} - K_{\text{и1}}. \quad (11b)$$

В выражениях (11) коэффициенты передачи  $K_{\text{п.пред}}$  и  $K_{\text{и.пред}}$  представляют собой коэффициенты передачи преобразованной адаптивной системы при нулевом задании, их максимально возможные величины для заданного в системе периода дискретности  $T_o$  определяются для системы с ШИМ1-1 и ШИМ1-2 с учетом (5) на основании выражений

$$K_{\text{п пред}} = R_{\text{H}} (1 - \exp(-1)) / K_{\text{дт}} K_{\text{ct}} (1 - \exp(-T_0 / T_{\text{H}})), \quad (12a)$$

$$K_{\text{и пред}} = R_{\text{h}} (1 - \exp(-1)) / K_{\text{дт}} K_{\text{ст.}} \quad (126)$$

Для системы с ШИМ2 максимально возможные величины коэффициентов передачи  $K_{\text{п.пред}}$  и  $K_{\text{и.пред}}$  определяются с учетом (8) на основании выражений

$$K_{\text{п пред}} = T_{\text{h}} R_{\text{h}} / T_{\text{o}} K_{\text{ct}} K_{\text{dt}}, \quad (13\text{a})$$

$$K_{\text{и пред}} = R_{\text{н}} / K_{\text{ст}} K_{\text{дт.}} \quad (136)$$

Анализ представленных выражений показывает, что с ростом отношения  $T_t / T_0$  растет величина коэффициентов передачи  $K_{n2}$  и  $K_{i2}$ , и, следовательно, повышается эффективность самонастройки. При  $T_t = T_0$  указанные коэффициенты передачи равны нулю, и, следовательно, возможность самонастройка исключена.

В системе с сигнальной адаптацией регулируемый ток всегда отличается от эталонного, оценку качества переходного процесса при заданных диапазоне изменения параметров объекта  $R_{\text{hv}}, L_{\text{hv}}, E_{\text{пв}}$ , периоде дискретности  $T_0$  и эквивалентной постоянной  $T_t$  следует осуществлять с использованием математической модели системы. Например, в системе с периодом дискретности  $T_0 = T_t/10$  обеспечиваются экспоненциальные по характеру переходные процессы с эквивалентной постоянной времени  $T_t$  при двухкратном изменении параметров объекта  $R_{\text{hv}}, L_{\text{hv}}, E_{\text{пв}}$  относительно расчетных значений  $R_h, L_h, E_n$ .

При построении адаптивных систем регулирования тока предельного быстродействия, когда эквивалентная постоянная системы  $T_t$  незначительно превышает период дискретности  $T_o$ , адаптационные свойства ограничены. В таких случаях целесообразно применить сигнально-параметрическую самонастройку. На рис. 4 представлена структурная схема такой системы. Она получена путем дополнения рассмотренной выше системы с сигнальной адаптацией контуром параметрической настройки. Последний включает в себя реализованные на микроЭВМ блок идентификации (БИ), осуществляющий вычисление изменяющихся параметров объекта  $R_{hv}$ ,  $L_{hv}$ , и цифровой регулятор ЦР<sub>1</sub> с перестраиваемыми коэффициентами передачи.

Импульсный характер напряжения на нагрузке и пульсации тока в нагрузке позволяют в квазистатическом режиме работы системы легко определять величины индуктивности  $L_{hv}$  и сопротивления нагрузки  $R_{hv}$ . Они могут быть вычислены в БИ с учетом (3) и закона Ома, соответственно, на основании выражений (14) и (15)

$$L_{\text{HV}}(n) = E_{\text{HV}}(n) \gamma(n) (1 - \gamma(n)) T_{\text{K}} / \Delta I(n), \quad (14)$$

$$R_{\text{HV}}(n) = E_{\text{HV}}(n) \gamma(n) / i(n). \quad (15)$$

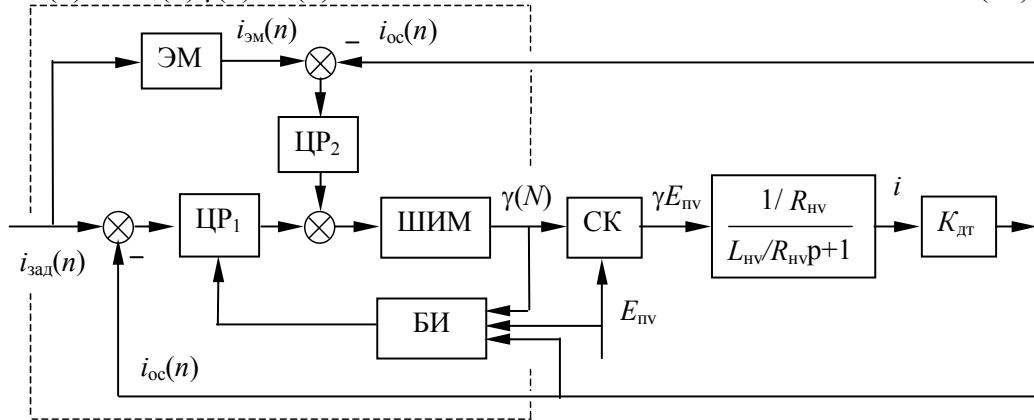
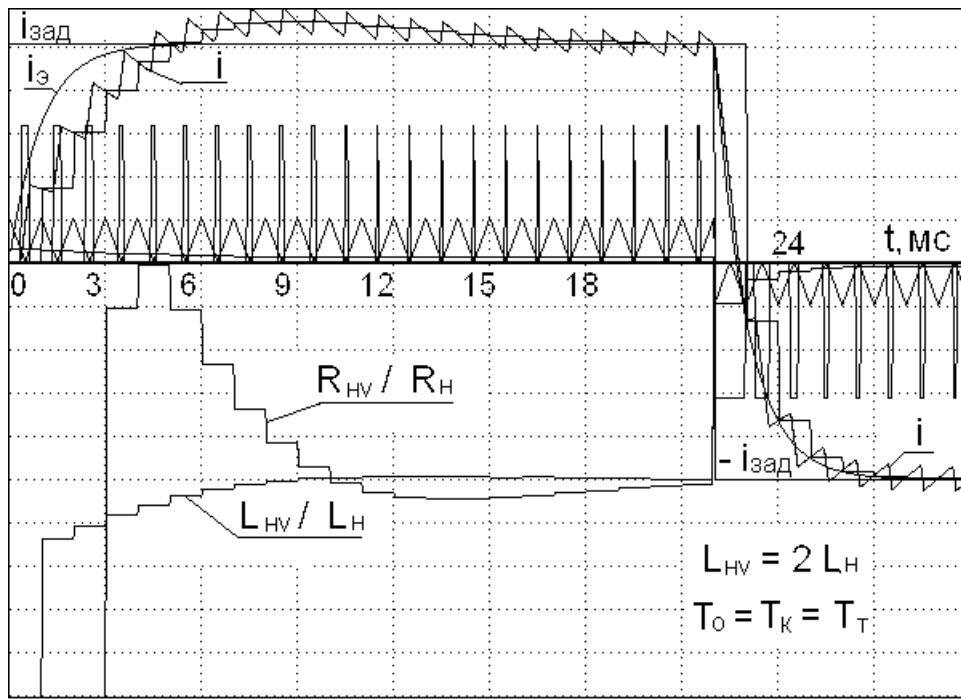
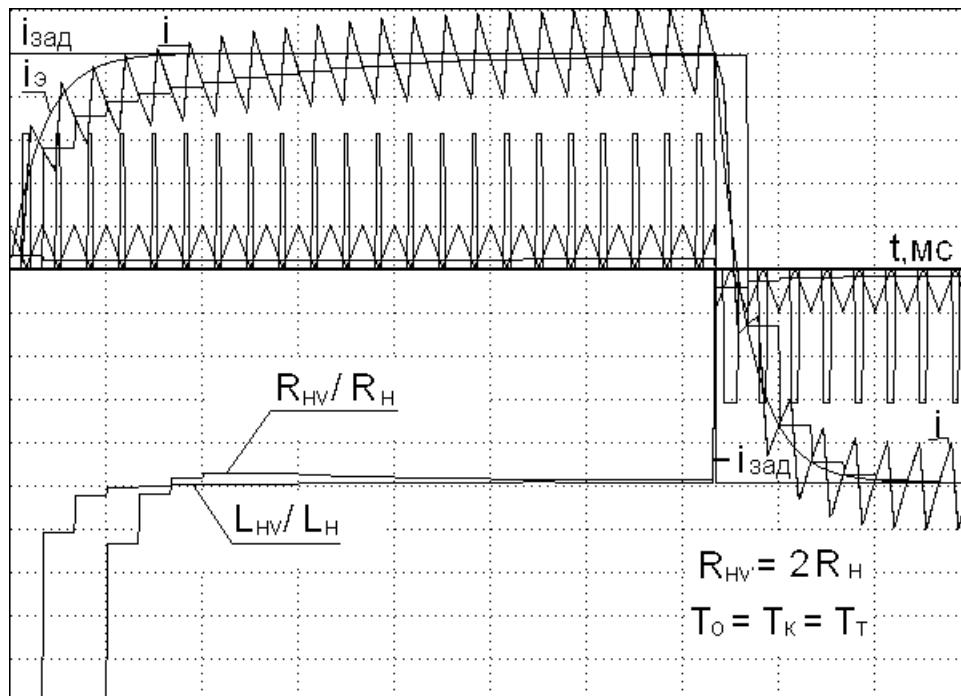


Рис. 4. Структурная схема системы регулирования тока с сигнально-параметрической адаптацией



а)



б)

Рис. 5. Процессы в системе с параметрической адаптацией при  $L_h$ -var (а), и  $R_h$ -var (б)

На рис. 5 представлены процессы, иллюстрирующие работу БИ, а также системы с параметрической настройкой при параметрах  $T_o = T_k = T_T$  и отключенном контуре сигнальной настройки. На первом интервале показаны переходные процессы в основном контуре при параметрах  $L_{\text{Hv}}=2L_h$  и  $R_{\text{Hv}}=2R_h$  без перестройки параметров регуляторов ЦР<sub>1</sub> и процессы в БИ при вычисления параметров  $L_h$  и  $R_h$ . На втором интервале приведены процессы в основном контуре, параметры регулятора ЦР<sub>1</sub> которого перестроены с учетом вычисленных в БИ значений  $L_{\text{Hv}}$  и  $R_{\text{Hv}}$ . Анализ представленных процессов свидетельствует об удовлетворительной работе БИ в квазистатических режимах работы системы.

Аналогично протекает работа БИ и при подключении контура адаптации с сигнальной настройкой.

Реализация цифровой ЭМ с динамическими свойствами апериодического звена первого порядка (1) с постоянной времени  $T_t$  и единичным коэффициентом передачи может быть осуществлена на основе охваченного отрицательной обратной связью интегратора согласно выражениям

$$\varepsilon(n) = i_{\text{зад}}(n) - U_i(n-1), \quad (16a)$$

$$U_i(n) = U_i(n-1) + K_{\text{им}} \varepsilon(n), \quad (16b)$$

$$i_{\text{ЭМ}}(n) = U_{\text{ЭМ}}(n) = (U_i(n-1) + U_i(n))/2, \quad (16c)$$

где  $i_{\text{зад}}(n)$  – сигнал задания на входе ЭМ,  $i_{\text{ЭМ}}(n)$  – выходной сигнал ЭМ,  $\varepsilon(n)$  – сигнал рассогласования на входе интегратора,  $U_i(n)$  – выходной сигнал интегратора.

Выбор коэффициента передачи  $K_{\text{им}}$  интегратора в уравнении (16b) на основании выражения

$$K_{\text{им}} = 1 - \exp(-T_o / T_t) \quad (17)$$

обеспечивает при отработке скачка задания  $i_{\text{зад}}$  на выходе модели, как это показано на рис.6, процесс  $i_{\text{ЭМ}}(n)$  по характеру близкий к эталонному процессу  $i_{\text{Э}}(t)$ .

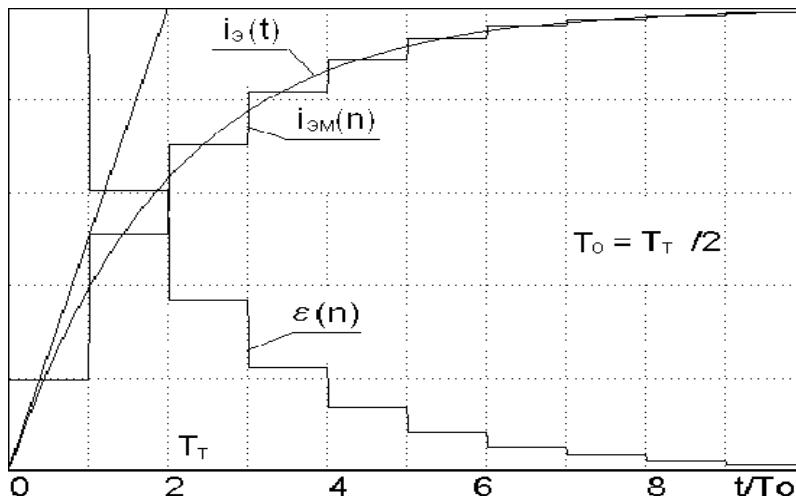


Рис. 6. Графики переходных процессов в цифровой ЭМ при отработке скачка задания

Предложенная методика параметрического синтеза цифровой адаптивной системы управления источника тока, построенного на основе ШИП, позволяет при заданных частоте коммутации силовых ключей преобразователя  $T_k$  и периоде дискретности вычисления управления  $T_o$  формировать экспоненциальные по характеру переходные процессы с заданной постоянной времени  $T_t$  в условиях возможных вариаций параметров объекта. Результаты математического моделирования системы свидетельствуют о правомерности методики и корректности расчетных соотношений.

## Литература

1. Гурьянов В.А., Кротенко В.В. Параметрический синтез цифровой системы управления источника тока, построенного на основе транзисторного ШИП. / Научно-технический вестник СПБИТМО(ТУ). Вып. 3. СПб, 2002.
2. Кротенко В.В. Толмачев В.А. Параметрический синтез системы управления программируемого источника тока, построенного на основе транзисторного ШИП. // Изв. вузов. Приборостроение. 1999. Т. 42. С. 49–54.
3. Соловьев В.В. Шрамко Л.С. Расчет и проектирование аналитических самонастраивающихся систем с эталонными моделями. М.: Машиностроение. 1972.

# МОДЕЛЬ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНОГО ПРИВОДА АККУМУЛЯТОРНОГО ЭЛЕКТРОВОЗА

Д.Г.Бакаев, Э.А.Загривный

Разработана математическая модель электропривода шахтного аккумуляторного электровоза АМ8Д на основе вентильного индукторного двигателя (ВИД), предназначенная для анализа электромеханических процессов в пусковых и буксовых режимах работы рудничного электровоза, для обеспечения оптимальных тяговых характеристик электропривода и алгоритма управления вентильным индукторным двигателем.

За последнее время достижения в области силовых полупроводниковых приборов позволили приступить к созданию современных приводов для электроподвижного состава. Пусковые режимы работы тягового электропривода на номинальной и максимальных частотах вращения, а также режим электрического торможения для рудничного контактного электровоза были рассмотрены в [1]. Настоящая статья посвящена вопросам обеспечения оптимальных тяговых характеристик электропривода шахтного аккумуляторного электровоза в режиме пуска и буксования. При проведении расчетных исследований использовано программное обеспечение по математическому моделированию электромагнитных процессов в вентильном индукторном двигателе с учетом насыщения магнитной системы [2]. При выборе зубцовой зоны были использованы рекомендации, приведенные в [3, 4]. В процессе проведения расчетных исследований зубцовая зона двигателя, площади основных сечений ярма статора и ротора не изменялись.

Построена общая структурная схема электромеханической системы с учетом источника питания ограниченной мощности и определены требования к системе автоматического управления электроприводом.

В основу расчета переходных процессов положены уравнения электромагнитного и электромеханического равновесия в системе тягового электропривода [5].

Схема усилий и моментов, действующих на колеса электровоза при работе привода в режиме буксования, показана на рис. 1.

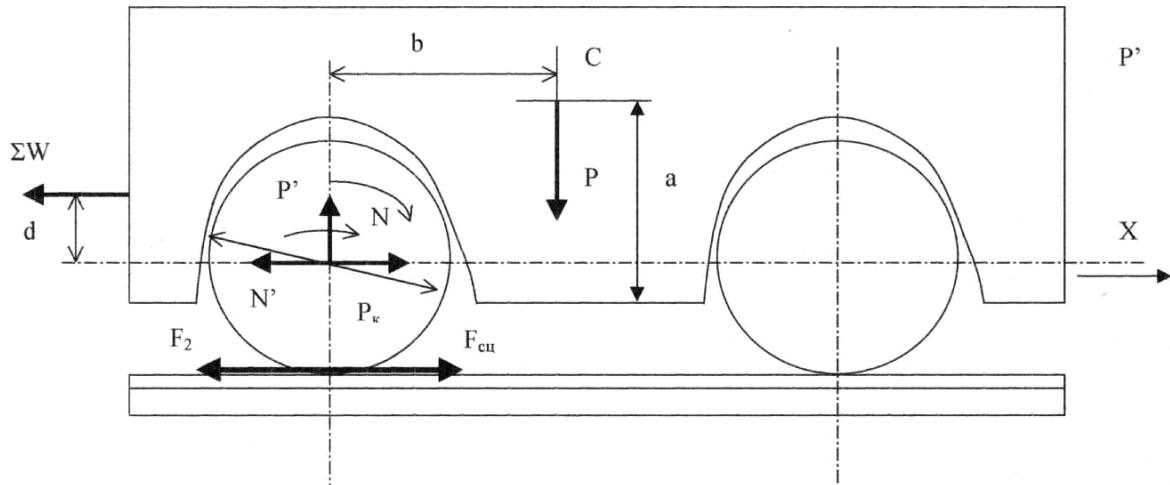


Рис.1. Схема усилий и моментов

В основу математической модели пускового режима тягового электровоза положена следующая система уравнений:

$$\frac{d\psi_{\phi j}}{dt} = U_{\phi j} - R \cdot I_{\phi j};$$

$$M_{\kappa} \frac{dV_{ck}}{dt} = F_m - F_{cu};$$

$$\Sigma W = g \cdot (P + Q) \cdot (w_n - i);$$

$$M_{np} \frac{dV_n}{dt} = F_{cu} - \sum W;$$

$$M_{np} = 1050(P + Q);$$

$$F_{cu} = g \cdot P \cdot \psi_P \cdot 10^3;$$

$$F_m = \frac{2 \cdot i \cdot M_{\phi j}}{D};$$

$$\Psi_p = \{0,23 - 0,022V_{CK}\}$$

где  $V_{CK}$  – скорость скольжения колес при буксовании;  $V_{П}$  – скорость поезда;  $\sum W$  – суммарное сопротивление движению поезда;  $P$  – масса электровоза;  $Q$  – масса электропоезда;  $i$  – передаточное отношение;  $\psi_P$  – коэффициент сцепления колес с рельсами. Общее время разгона поезда составляет примерно 90 сек.

Коэффициент сцепления колес с рельсами в имитационной модели изменялся ступенчато от значения  $\psi_P1=0,23$  до значения  $\psi_P2=0,1$  посредством сумматора и ступенчатого входного воздействия. Время наступления пробуксовки задавалось равным 5 с. Числовые данные поезда с вагонетками и электровозом АМ8Д:  $Q = 312$  т – полный вес поезда;  $P = 14$  т. – вес электровоза;  $w_n = 1,5w_o = 1,5 \cdot 4 = 6 \frac{H}{\kappa H}$ . Уклон пути принят равным  $i = 3\%$ .

При движении поезда по рудничным откаточным путям коэффициент сцепления изменяется в широких пределах. При реализации тяговых усилий в процессе разгона поезда в некоторых случаях (увеличение сопротивлению движению, снижение коэффициента сцепления и т.д.) выполняется условие  $F_m > F_{cu}$ . Работа привода происходит в зоне избыточного буксования. В соответствии с  $M_{np} \frac{dV_n}{dt} = F_{cu} - \sum W$  это приведет к увеличению ускорения скольжения и, следовательно, к повышению потерь энергии на буксование.

В зависимости от сочетаний параметров привода электровоза и характеристики сцепления возможны установившийся или разносный режимы избыточного буксования. При разносном режиме буксования происходит автоматическое увеличение скорости буксующих колесных пар при уменьшении их нагрузки. Этот режим работы обуславливает значительную долю потерь энергии на буксование колес электровоза. Поэтому он является нежелательным.

На рис. 2. представлена имитационная модель аккумуляторного рудничного электровоза АМ8Д совместно с вентильно-индукторным двигателем. Математическая модель разработана при помощи программы MatLab 6.5 Release 13 [6]. Программа MatLab содержит широкий спектр типовых динамических звеньев, как линейных, так и нелинейных [7].

Скорость поезда вычислялась на выходе интегрирующего звена с обратной связью [8]. На входе звена алгебраически суммировались с помощью сумматора сила сцепления колес с рельсами и суммарное сопротивление движению поезда. Суммарное сопротивление движению поезда моделировалось с помощью двух усилителей сигналов и блока ограничения сигнала.

Скорость колеса вычислялась с помощью сумматора, на входах которого алгебраически суммировались скорость скольжения и скорость поезда. Результаты представлены на рис. 3–5.

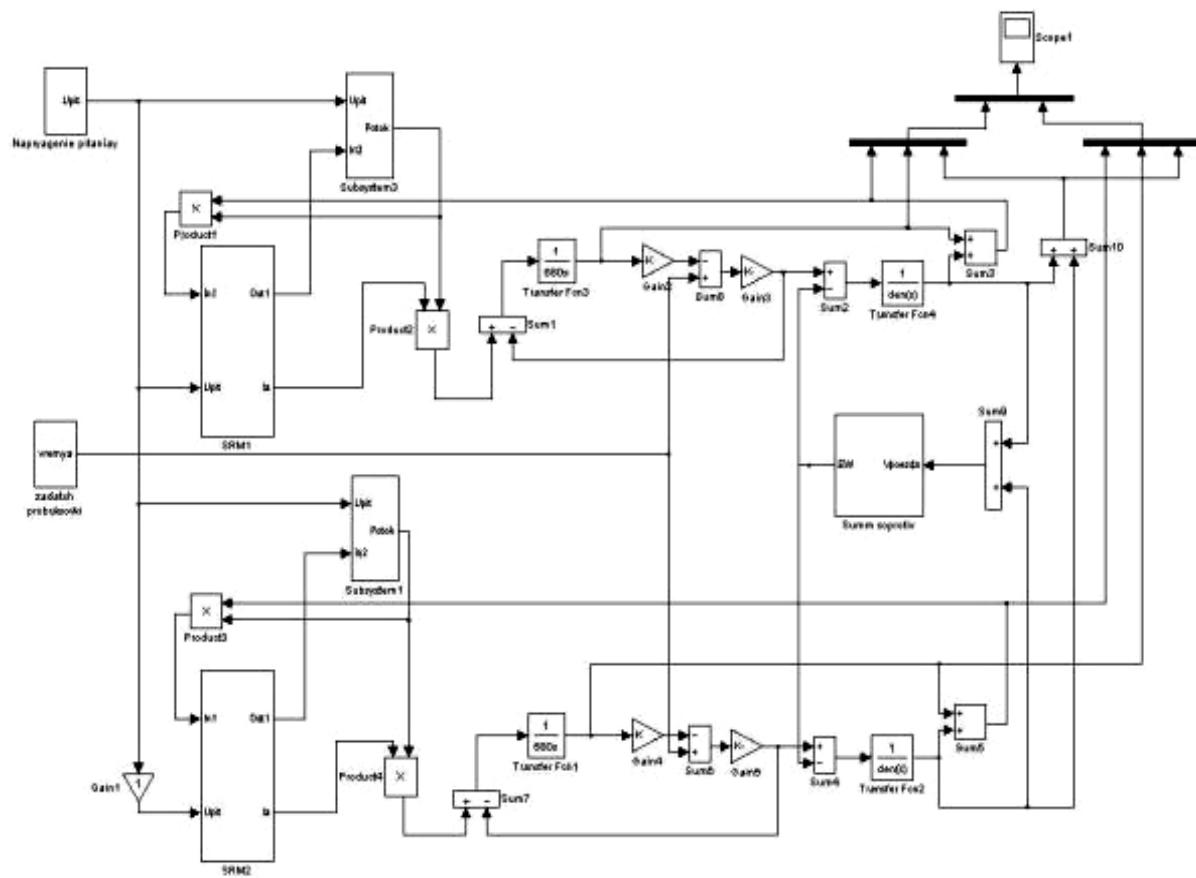


Рис. 2. Математическая модель аккумуляторного электровоза на основе ВИД

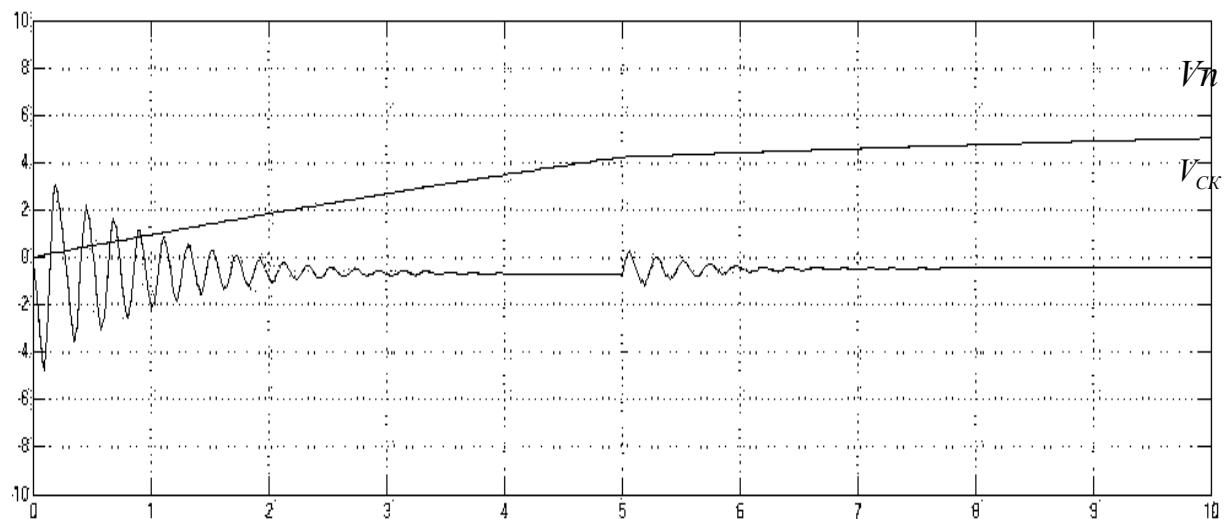


Рис. 3. Режим пуска при одинаковых пусковых условиях для двигателей:  
 $V_n$  – скорость поезда;  $V_{ск}$  – скорость скольжения

Разработанная математическая модель электропривода электровоза обеспечивает оптимальные тяговые характеристики электропривода электровоза. Результаты расчета пускового и буксового режимов подтверждают, что использование ВИД в приводе электровоза позволяет эффективно использовать энергию аккумуляторной батареи при работе электровоза в зоне избыточного буксования.

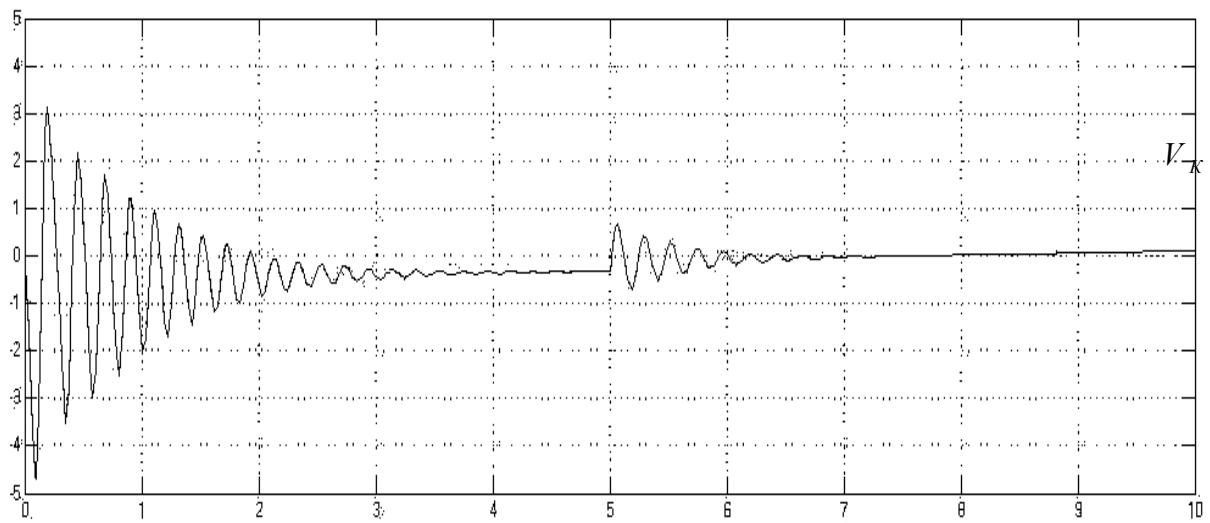


Рис. 4.. Скорость колесных пар при одинаковом коэффициенте сцепления колес с рельсами

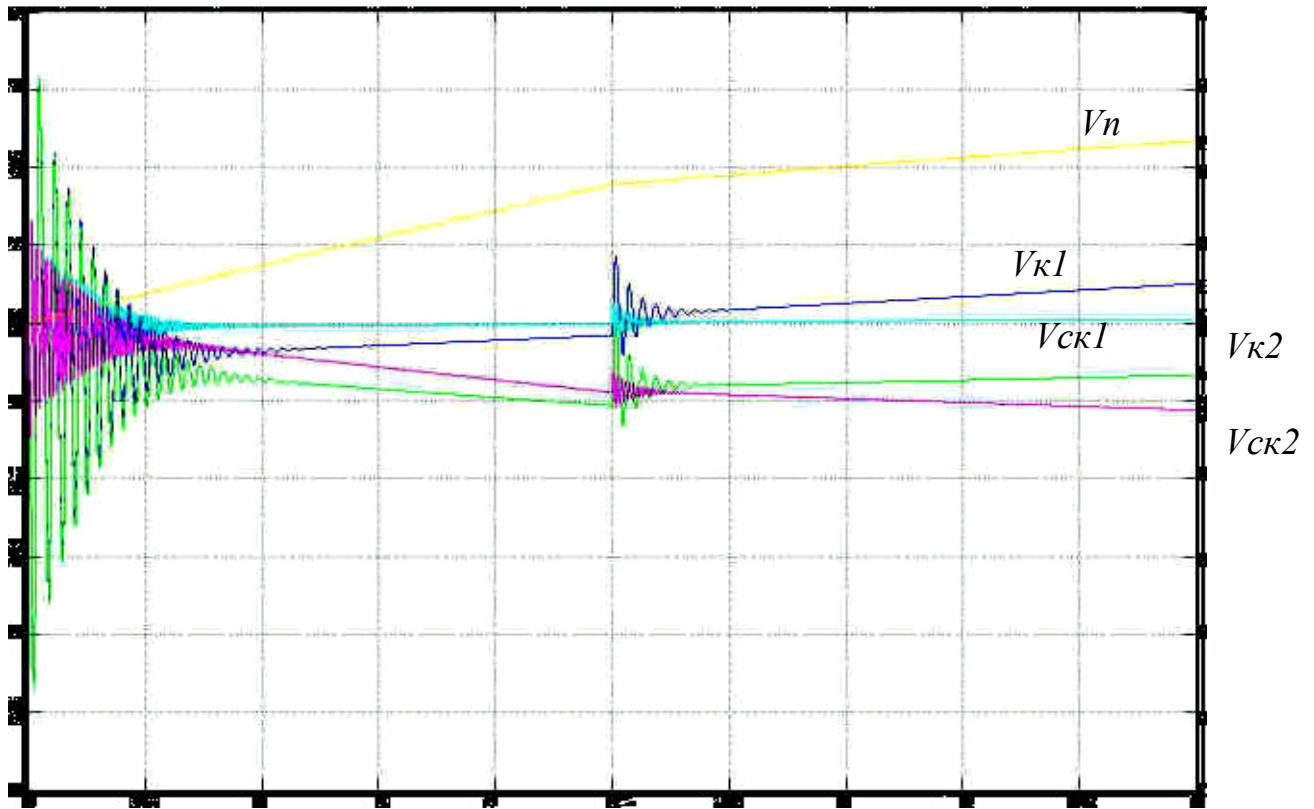


Рис. 5.. Режим пуска при различных пусковых условиях для двигателей по пробуксовке колесных пар:  $V_n$  – скорость поезда;  $V_k1$  – скорость колеса передней колесной пары;  $V_{ck1}$  – скорость скольжения первого двигателя;  $V_k2$  – скорость колеса задней колесной пары;  $V_{ck2}$  – скорость скольжения второго двигателя

### Литература

1. Коломейцев Л.Ф., Прокопец И.А., Пахомин С.А., Крайнов Д.В. Режимы работы тягового электропривода рудничного электропоезда с трехфазным реактивным индукторным двигателем // Изв. вузов. Электромеханика. 2002. № 2. С. 18–22.

2. Коломейцев Л.Ф., Пахомин С.А., Прокопец И.А. и др. Расчет электромагнитных процессов в трехфазном управляемом индукторном двигателе // Сб. науч. тр. ОАО ВЭлНИИ. Электровозостроение. 1997. Т. 38. С. 234–245.
3. Пахомин С.А., Прокопец И.А. и др. Выбор соотношения зубцов статора и ротора в тяговом реактивном индукторном двигателе // Сб. науч. тр. ОАО ВЭлНИИ. Электровозостроение. 1997. Т. 38. С. 223–234.
4. Пахомин С.А. Влияние геометрии зубцового слоя и параметров питания на показатели вентильного реактивного индукторного двигателя // Изв. вузов, Электромеханика, 2000, № 1, С. 30–36.
5. Копылов И.П. Электромеханические преобразователи энергии. М.: Энергия, 1973.
6. Петрушин А.Д. Вентильно-индукторный привод: опыт разработки и внедрения // Приводная техника. 1998. №2.
7. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. СПб: КОРОНА прнт, 2001. 320с.
8. Волотковский С.А. Рудничная электровозная тяга. М.: Недра, 1981. С.390.

## САПР ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ВОДНОЙ СРЕДЫ. Ю.Ю. Гатчина

Работа посвящена созданию системы имитационного моделирования дистанционного зондирования водной среды. Рассмотрены вопросы, связанные с выбором способа организации имитации и формирования модели ДЗВС. Приведена структурная схема математической имитационной модели ДЗВС.

### Введение

На современном этапе развития общества наиболее актуален вопрос о необходимости регулярного контроля параметров окружающей среды.

Методы дистанционного зондирования – это научное направление для проведения измерений поверхности с использованием сенсоров, таких как различные камеры на борту летательных аппаратов, приемники системы глобального позиционирования или другие устройства. Эти датчики собирают данные в виде наборов координат или изображений (в настоящее время преимущественно цифровых) и обеспечивают специализированные возможности обработки, анализа и визуализации полученных данных.

Самая важная часть дистанционного зондирования – анализ изображений. Такой анализ может выполняться визуально, визуальными методами с применением вычислительной техники, а также целиком и полностью компьютером; последние два включают в себя анализ данных в цифровой форме.

Первоначально большинство работ по анализу данных, полученных дистанционным зондированием, выполнялось визуальным исследованием индивидуальных аэрофотоснимков или путем использования стереоскопа и наложения фотоснимков с целью создания стереомодели. Создание современных систем ДЗВС невозможно без применения средств вычислительной техники и пакета прикладных программ. Наиболее эффективна реализация полученной информации и обработка ее в рамках систем автоматизированного проектирования (САПР) [1]. Для исследования этих вопросов необходимо построение системы имитационного моделирования, являющейся подсистемой САПР.

### Методология построения имитационной модели

Имитационное моделирование представляет собой имитацию поведения с использованием поведения другой системы, называемой имитатором либо в виде активируемых подсистем, либо в виде математических соотношений. Имитатор является упрощенной моделью реальной ИУС, но выполненный с возможностью изменения своих параметров, как на уровне подсистем, так и системы в целом. Целью проведения моделирования является получение предварительных оценок по параметрам реальной или проектируемой ИУС, что позволяет существенно сократить трудозатраты, как по поиску проектных решений, так и по аттестации реальной системы.

Имитационная модель дистанционного зондирования водной среды (ДЗВС) является отображением функционирования подсистем реального объекта. При этом основное преимущество имитационного моделирования заключается в возможности проведения компьютерного моделирования ДЗВС путем моделирования его составных

звеньев. Процесс формализации составляющих ДЗВС как условно независимых предопределяет успех всего компьютерного моделирования. После выбора средств реализации можно переходить к этапу преобразования формального описания в описание имитационной модели. Если имитационную модель можно представить с помощью таких универсальных средств описания, как, например агрегативные схемы или системы массового обслуживания, то указанный этап совпадает с предыдущим. При переходе к более сложным системам это различие проявляется. Прежде всего, не удовлетворяет состав стандартной статистики при моделировании, реализуемой соответствующими алгоритмами. Кроме того, появляется множество дополнительных трудностей, связанных с выбранным способом организации имитации. Как правило, в этих случаях приходится решать ряд дополнительных вопросов, не связанных с описанием поведения ДЗВС, как, например:

- декомпозиция ДЗВС на составляющие подсистемы и формирование элементов модели;
- обеспечение необходимой синхронизации частей подсистем в модельном времени;
- задание начальных условий моделирования;
- планирование процесса имитации отдельных вариантов ДЗВС;
- проверка окончания моделирования;
- обработка результатов имитации;
- организация сбора статистики.

Результатом этапа должно быть завершение описания имитационной модели как части САПР системы ДЗВС.

Отображение реальной подсистемы ДЗВС в виде имитации на ЭВМ, а соответственно, и алгоритма, возможно при наличии адекватного аналитического или логического описания.

Следует подчеркнуть роль системного анализа как основного инструмента исследования экологических систем различного уровня, когда проведение широкомасштабных натурных исследований и экспериментов зачастую невозможно или затруднено. Следует рассмотреть текущее состояние исследований в области применения информационных технологий и математического моделирования для решения преимущественно экологических задач и оптимизации природопользования, провести анализ количественных методов описания динамики экологических систем, показать возможности экологических моделей при составлении экологических прогнозов.

На этапе проектирования (моделирования) осуществляется выбор варианта проектного решения или принятие решения о стратегии функционирования ее в зависимости от исходных данных. Известны три метода моделирования – физическое, математическое и моделирование с реальной аппаратурой. Математическое моделирование является более актуальным, хотя бы в плане ресурсных и временных затрат

Важным моментом при составлении математической модели является выделение главных и второстепенных факторов моделируемых процессов. Поэтому построение математической модели осуществляется на основе физических законов, заложенных в основу функционирования как всей системы, так и отдельных ее составляющих, а также на основе обработки экспериментальных данных, полученных в результате, например, физического моделирования аналогичных систем и устройств.

В процессе исследования нужно учесть конструкторско-технологические погрешности аппаратуры как в ее исполнении, так и в реализуемых ею алгоритмах, которые можно назвать условно «ошибкой». Важны также гидромеханическое воздействие на аппаратуру («возмущение») и влияние водной среды на информационный признак объекта, который назовем условно «помехой». Влияние «возмущения» можно компенсировать, «ошибку» можно учесть как инструментальную, а влияние «помехи» можно только предугадать и соответственно ввести корректиры на выходную информацию.

Каждому типу возмущений соответствуют свои типы компенсирующих систем, позволяющие осуществлять частичную или полную компенсацию. Обычно характер возмущающего воздействия нельзя считать детерминированной функцией времени, но они могут быть проанализированы с применением математического аппарата теории вероятности и случайных функций, при этом математическое ожидание случайной функции  $x(t)$  можно принять равным нулю:

$$\overline{x(t)} = M[x(t)] = 0.$$

В общем случае схема функционирования и взаимодействия гидрооптического прибора с внешней средой может быть представлена как замкнутая динамическая система, к особенностям функционирования которой следует отнести:

- нестационарность внешних возмущений и параметров водной среды и, как следствие этого, нестационарность процессов регистрации информационных признаков объекта, определяемая тем, что изменение вектора  $R$  как во времени, так и в пространстве описывается дифференциальными или разностными уравнениями (определяется типом информационного признака; так, например, при регистрации градиента показателя преломления водной среды это разностные уравнения), в результате решения которых вырабатывается оценка текущего состояния;
- наличие в системе как оптических, так и неоптических связей;
- необходимость работы в реальном масштабе времени при требуемом быстродействии.

Для компьютерной реализации модели ДЗВС необходим специальный аппарат моделирования, в котором должны быть, в частности, предусмотрены:

- способы организации данных, обеспечивающие простое и эффективное моделирование ДЗВС;
- удобные средства формализации и воспроизведения динамических свойств моделируемой ДЗВС;
- возможности имитации стохастических систем, т.е. процедуры генерирования и анализа случайных величин и временных рядов.

Такой аппарат моделирования должен иметь специализированные средства, содержащие в своем составе язык описания объекта моделирования, средства обработки языковых конструкций (компилятор, транслятор или интерпретатор), управляющую программу моделирования, осуществляющую имитацию во времени, а также набор стандартных программных средств, реализующих дополнительные возможности по организации модельных экспериментов. Применение универсальных языков программирования в имитационном моделировании позволяет достигнуть наибольшей гибкости при разработке, отладке и испытании модели ДЗВС. Однако при этом затрачиваются большие усилия на программно-аппаратные средства моделирования. Поэтому часто целесообразнее применять специализированные средства моделирования, которые обладают определенными преимуществами перед универсальными. К таким преимуществам относятся: меньшие затраты времени на программирование, более эффективные методы выявления ошибок имитации, краткость, точность выражения понятий, характеризующих имитационные процессы, возможность для некоторой конкретной предметной области исследований предварительного построения стандартных компонентов, которые могут применяться пользователями при построении необходимых имитационных моделей данного вида. Такая система дает возможность автоматического формирования типов данных, соответствующих принятому способу имитации и необходимых в процессе имитационного моделирования, а также обеспечивает удобство накопления и представления выходных данных и возможность распределения памяти ЭВМ в процессе имитационного эксперимента.

Для построения специализированных средств моделирования необходимо определить причинно-следственные связи проектируемой ДЗВС, при этом использовать такие

аналитические средства, как интегральное исчисление, параметрический анализ и графическую оптимизацию [2]. Модель ДЗВС представлена в виде взаимосвязанных функциональных элементов и эмулируется на ЭВМ. При этом описание модели представляет собой совокупность фраз, задающих правила коммутации элементов моделирующего устройства, поведение которых реализуется соответствующими стандартными функциями.

Для моделирования типовых элементов ДЗВС у исследователя должна быть обеспечена возможность построения набора специальных функций применительно к конкретной задаче. В связи с этим широкое применение имитационного моделирования в процессе проектирования и эксплуатации ДЗВС делает актуальной задачу создания специализированных методик построения имитационных моделей, основное содержание которых, как правило, должно сводиться к следующей последовательности этапов построения компьютерно-ориентированной имитационной модели ДЗВС:

1. содержательное описание объекта моделирования;
2. концептуальная модель объекта моделирования – переход от реального ДЗВС к логической схеме его функционирования;
3. формальное описание объекта моделирования – реализация описания ДЗВС в терминах математических понятий и алгоритмизация функционирования его компонент с последующим преобразованием формального описания ДЗВС в его компьютерно-ориентированное описание;
4. имитационная модель ДЗВС и выбор критериев оценки ее достоверности;
5. программирование и отладка алгоритма имитационной модели ДЗВС;
6. исследование свойств имитационной модели объекта моделирования – тестирование и верификация компьютерно-ориентированной модели ДЗВС, оценка ее свойств и затрат ресурсов;
7. организация компьютерного моделирования ДЗВС;
8. анализ результатов моделирования объекта моделирования – интерпретация результатов компьютерного моделирования ДЗВС.

На рис.1 представлена схема физико-математического полигона для исследований и поиска проектных решений для гидрооптической аппаратуры, где приняты следующие символические и функциональные обозначения:

- модуль  $M_1$  – генератор ситуаций, предназначенный для имитации условий функционирования (задание: метеоусловий; время года; время суток);
- модуль  $M_2$  – моделирует процедуру формирования и распространения информационных признаков объекта, регистрируемых аппаратурой;
- модуль  $M_3$  – генератор состояния среды (имитирует влияние гидрооптических и гидрофизических параметров водной среды на информационный признак);
- модуль  $M_4$  – генератор помех;
- модуль  $M_5$  – генератор процедуры анализа (последовательная, параллельная или комбинированная) в заданной системе регистрируемых информационных признаков;
- модуль  $M_6$  – имитирует преобразование системы информационных признаков;
- модуль  $M_7$  – имитатор приемной оптической системы;
- модуль  $M_8$  – реализация анализа режимов захвата и срыва слежения за информационными признаками;
- модуль  $M_9$  – имитатор режимов регистрации и слежения информационных признаков объекта;
- модуль  $M_{10}$  – содержит модель прогнозатора поведения информационных признака;
- модуль  $M_{11}$  – модуль обработки результатов моделирования; в этом модуле содержится алгоритм обработки результатов моделирования и сервисные программы.

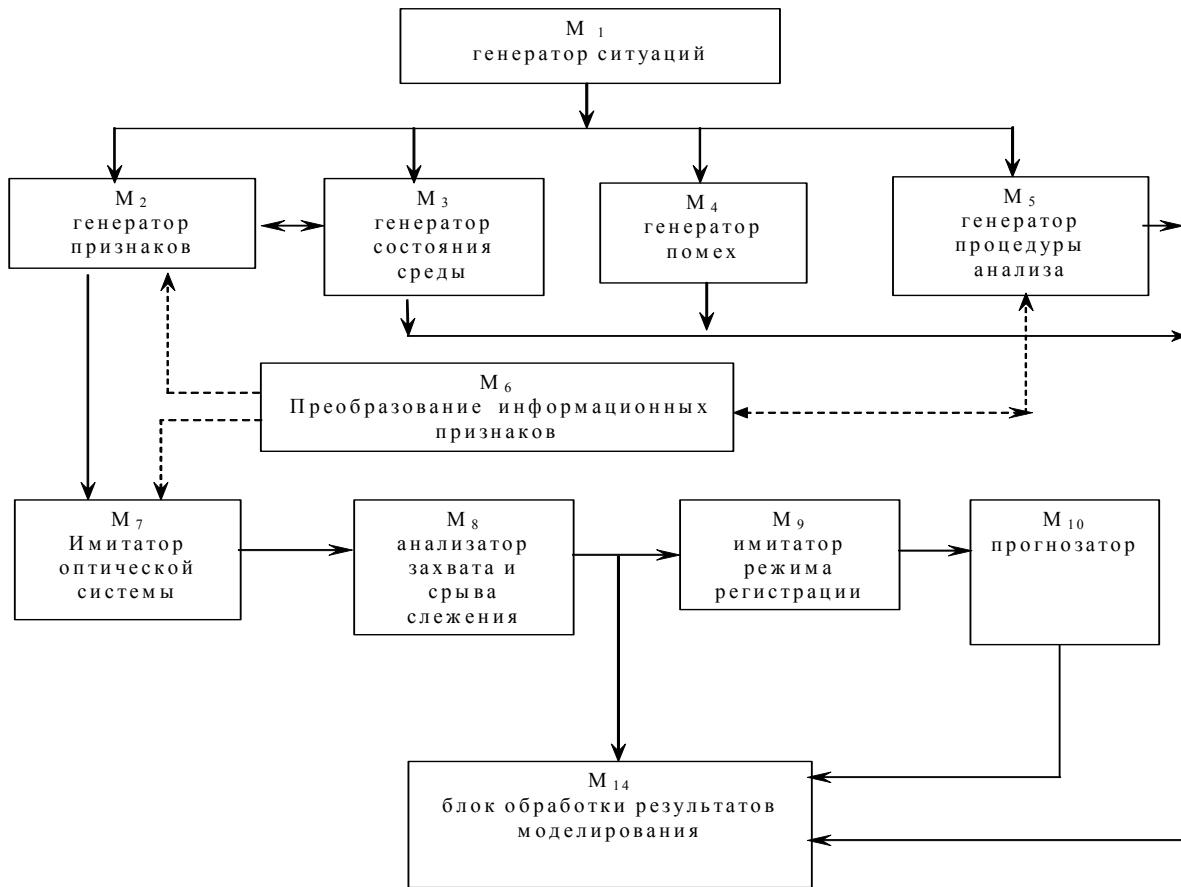


Рис. 1. Схема физико-математического полигона для исследований и поиска проектных решений для гидрооптической аппаратуры

Таким образом, рассмотрены этапы построения компьютерно-ориентированной имитационной модели ДЗВС. Структура позволяет в рамках САПР спроектировать оптимальную модель ДЗВС, которая снижает время и затраты, сокращает время и не требует натурных исследований. Система позволяет рассмотреть множество вариантов с учетом различных начальных условий и ограничений, накладываемых на систему.

### Литература

1. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования. М.: Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2002. 336 с.
2. Шеннон Р. Имитационное моделирование систем. Искусство и наука. М.: Мир, 1978. 418 с.
3. Демин А.В., Копорский Н.С., Немолочнов О.Ф. Имитационное моделирование систем поиска и наведения. Санкт-Петербургский государственный институт точной механики и оптики. Россия. Санкт-Петербург. 1998. II с:25 ил.-9. Библиогр.11. И назв.-Рус.-Деп. В ВИНИТИ № 3840-В98 от 23 декабря 1998.

# МЕТОДЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ И ТЕХНОЛОГИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В ИНТЕГРИРОВАННЫХ САПР

## И.Б. Бондаренко

В работе разработан математический аппарат с использованием технологии искусственного интеллекта для оптимизации проектных решений на начальной стадии проектирования автоматизированных технологических комплексов, который реализован в виде программной подсистемы САПР.

### Введение

С использованием в интегрированных САПР автоматизированных технологических комплексов (САПР АТК) математического аппарата методов оптимизации проектных решений перед разработчиком встает задача сохранения и оперативной обработке потоков данных [1]. Из-за варьирования типов данных и их структур возникает потребность в создании интеллектуальных баз данных (БД) и баз знаний (БЗ) с использованием технологии искусственного интеллекта (ИИ).

Для описания сложных технологических систем (ТС), в которых можно выделить различные уровни подчиненности, используются иерархические структуры (рис. 1(а)). Для рассмотрения иерархических структур используется теория графов, где вершины представляют собой отдельные подсистемы, а связи между вершинами – информационные потоки общения подсистем между собой [2].

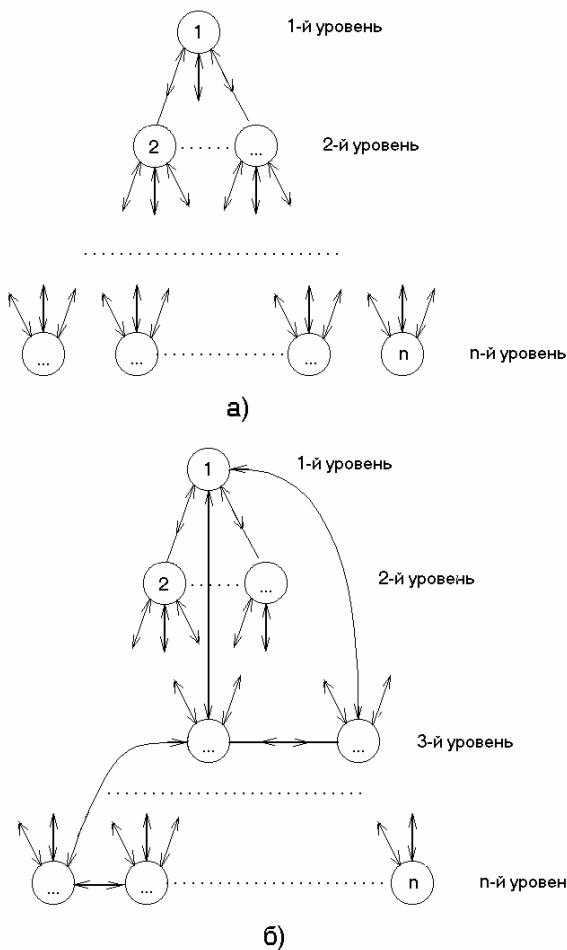


Рис. 1. Примеры иерархических структур

При описании сложных ТС, например, относящихся к оптической промышленности, необходимо учитывать, что:

- в систему входят горизонтальные связи, определяющие их функциональную взаимосвязь;
- возможен информационный поток, связывающий подсистемы не ступенчато, а через один или несколько уровней;
- возникает необходимость многократного циклирования между подсистемами одного или разных уровней;
- ветви дерева могут отсекаться на любом уровне;
- вся структура в целом представляет несимметричную конструкцию связей и подсистем (рис. 1(б)).

Из-за этого работа интегрированных САПР АТК с подобными иерархическими структурами становится сложной как при внесении дополнительной информации (дополнительных вершин и связей), так и при поиске необходимой информации. Поэтому, несмотря на рост возможностей вычислительной техники, организация работы с деревьями и вершинами сложных иерархических структур может стать «узким местом», тормозящим работу всей системы в целом. Особенно это касается предварительного или начального этапа проектирования, на котором количество уровней стремительно растет при движении к цели. Современные программные средства создания иерархических структур не учитывают аспектов, изложенных выше, и поэтому не позволяют работать с максимальным быстродействием. Вследствие этого разработка методов оптимизации по работе со сложными иерархическими структурами является актуальной и подлежит раскрытию в данной работе.

## Теоретическая часть

Так как скорость обработки информации в исследуемых системах зависит от оптимальности их структуры, то для организации хранения и быстрого поиска информации по деревьям была разработана подсистема с использованием следующих теоретических аспектов [4].

Порядок вхождения подсистем в иерархическую систему определяет морфологию сложной ТС [5]. Для построения морфологической структуры использовано математическое описание иерархической системы, которое выглядит следующим образом для  $n$  подсистем:

$$I_i = \{1, 2, \dots, M_i\}, \quad i = 1, 2, \dots, n.$$

Для каждой из подсистем характерно наличие:

- множества векторов состояния объекта проектирования  $\mathbf{X}_{ij}$ , где  $i$  – уровень иерархической системы, а  $j$  – номер подсистемы в  $i$ -м уровне;
- множества векторов локальных выходных переменных  $\mathbf{Y}_{ij}$ , по которым производится управляющие действия в данной подсистеме;
- множества векторов обобщенных выходных переменных  $\mathbf{Z}_{i+1,j}$ , обеспечивающих поток информации, передаваемый в  $j$ -ю подсистему, находящуюся на  $(i+1)$ -м уровне;
- множества векторов обобщенных выходных переменных  $\mathbf{Z}'_{i-1,j}$  – поток информации, поступающий из  $j$ -й подсистемы, находящейся на  $(i-1)$ -м уровне;
- множества векторов самоуправления  $\mathbf{U}_{ij}$ ;
- множества векторов управления  $\mathbf{U}'_{i+1,j}$  данной подсистемой  $i$ -го уровня посредством  $j$ -х подсистем нижестоящих  $(i+1)$ -х уровней;

- множества векторов управления  $\mathbf{U}_{i-1,j}$ , с помощью которых данная подсистема  $i$ -го уровня управляет  $j$ -ми подсистемами  $(i-1)$ -го уровня;
- множества векторов внешних возмущений  $\mathbf{F}_{ij}$ , действующих на данную подсистему, задаваемых в виде детерминированных постоянных либо в виде случайных величин с известными законами распределения;
- множества векторов связей  $\mathbf{S}_{ij}$ , идущих в  $j$ -ю подсистему от других подсистем этого уровня.

Тогда отображение критерия оптимальности  $\Phi_{ij}$   $j$ -й подсистемы имеет вид

$$\Phi_{ij}: U_{ij}^* \times Y_{ij} \times U_{i+1,j}^* \times S_{ij} \rightarrow V_{ij}^*,$$

где  $V_{ij}^*$  – множество значений критерия  $\Phi_{ij}$ , а отображение критерия, при оптимизации которого данная подсистема определяет управляющие воздействия  $\mathbf{U}_{i-1,j}$ , на подсистемы  $(i-1)$ -го уровня имеет вид

$$f_{ij}: U_{i-1,j} \times U_{ij} \times Z_{i-1,j} \rightarrow V_{ij}.$$

Кроме того, подсистемы описываются отображениями, характеризующими ограничения на вектор локальных выходных переменных, вектор состояния, вектор самоуправления и на вектор управляющих воздействий, которые, соответственно, будут иметь вид

$$g_{ij}: Y_{ij} \rightarrow G_{ij}, \quad q: X_{ij} \rightarrow Q_{ij}, \quad h: U_{ij} \rightarrow H_{ij}, \quad h: U_{ij} \rightarrow H_{ij},$$

где  $\mathbf{G}_{ij}$   $\mathbf{Q}_{ij}$   $\mathbf{H}'_{ij}$   $\mathbf{H}_{ij}$  – множества значений соответствующих ограничений.

Аналогично описываются все подсистемы  $n$ -уровневой иерархической системы, кроме подсистем 1-го и  $n$ -го уровней. Подсистемы 1-го, наивысшего уровня, не имеют выходных переменных, поступающих в верхний по отношению к ним уровень, а подсистемы последнего,  $n$ -го уровня не соединены информационным потоком с нижним по отношению к ним уровнем, что влечет за собой отсутствие вектора управляющих воздействий  $\mathbf{H}_{ij}$ .

Таким образом, иерархическая система представляет собой набор подсистем, имеющих развитую сеть информационных потоков взаимодействия друг с другом, что приводит к необходимости рассмотрения всех подсистем.

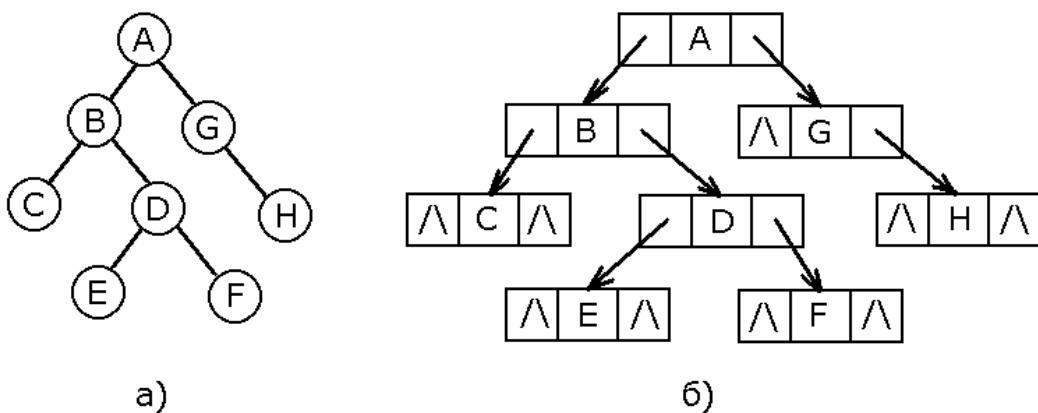


Рис. 2. Бинарное дерево (а) и его представление с помощью узлов (б)

В связи с большой размерностью векторов воздействий и информационных потоков, а также с многопараметрическими временными характеристиками подсистем иерархическую структуру принятия решений необходимо оптимизировать для удобства дальнейшего использования. Для этого в нашем рассмотрении перейдем от обычного

описания деревьев поиска к бинарному (рис.2, а, б). Бинарные деревья содержат информационное поле и указатели местоположения корней левого и правого поддеревьев. Знак  $\wedge$  означает, что узел является конечным и левого и/или правого под дерева не существует.

Для обработки узлов необходимо прохождение бинарного дерева в симметричном порядке: левое поддерево – корень – правое поддерево.

Идея метода бинарного поиска состоит в поиске имени  $z$  в интервале, ограниченном низом  $l$  и верхом  $h$ . Текущий указатель  $m$  устанавливается приблизительно посередине интервала  $[l, h]$ , образуя подинтервалы  $[l, m-1]$  и  $[m+1, h]$ . Если интервалы пусты, то поиск заканчивается неудачей. Поиск ведется на дереве бинарного поиска, которое представляет собой расширенное бинарное дерево, все внутренние узлы которого помечены именами из списка  $x_1, x_2, \dots, x_n$  таким образом, что симметричный порядок узлов совпадает с естественным порядком.

Взвешенная длина пути дерева бинарного поиска определяется по формуле [3]:

$$|T| = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot p(x_i) + \sum_{\text{листья } y_i \in T} \alpha_i \cdot p(y_i),$$

где  $p$  – уровень расположения узлов  $x$  или листьев  $y$  в дереве  $T$ ;  $\beta_i$  – частоты обращения к узлам  $x$ ;  $\alpha_i$  – частоты обращения к листьям дерева  $T$  с неудачным поиском. Тогда среднее время поиска по дереву  $T$  определяется следующим образом:

$$t_{cp} = |T| + \sum_{i=1}^n \beta_i.$$

Для интерпретации частот  $\beta_i$  и  $\alpha_i$  как вероятностей их необходимо нормировать по соотношению

$$\sum_{i=0}^n \alpha_i + \sum_{i=1}^n \beta_i = 1.$$

Для использования в составе САПР АТК необходимо, чтобы алгоритм нахождения узла выполнялся за более короткое время. Время выполнения приближается к оптимальному при условии оптимальности или почти оптимальности дерева бинарного поиска  $T$ . При этом оптимальные деревья бинарного поиска практически неприменимы из-за большой величины множества узлов, а также из-за неопределенности по значениям частот  $\beta_i$  и  $\alpha_i$  [5]. К тому же существуют эвристические алгоритмы построения почти оптимальных деревьев, среднее время поиска по которым близко к оптимальному варианту.

Для построения почти оптимального дерева необходимо выполнение следующих требований при включении/удалении узлов:

1. поддерживать дерево сбалансированным. Если полученное дерево является асимметричным, то среднее время поиска будет линейным вместо логарифмического. Для балансировки бинарного дерева необходимо выбирать корни всего дерева и поддеревьев так, чтобы у левого и правого поддеревьев были приближенно равные число узлов либо суммы весов  $\beta_i$ ;

2. помещать узлы с наибольшими весами  $\beta_i$  около корня, тогда после выполнения этой операции получается дерево, у которого веса узлов монотонно не возрастают вдоль любого пути от корня к листу. Тогда деревья будут монотонными.

С другой стороны, для разветвленных деревьев с большим числом узлов в среднем сбалансированные деревья так же хороши, как оптимальные, а монотонные деревья так же плохи, как случайные, так как все узлы дерева равновероятно являются претендентами на то, чтобы стать корнем. Поэтому при построении почти оптимального дерева будем добиваться максимальной сбалансированности, а затем подвергать дерево монотонности лишь локально, чтобы не ухудшить балансировку.

Процедуры включения и удаления узлов влияют на вид дерева бинарного поиска, что увеличивает среднее время поиска. Для последующей балансировки может потребоваться перестройка всего дерева с обработкой всех узлов, что при большой мощности дерева  $T$  потребует значительных временных затрат. Поэтому проводятся локальные изменения вдоль пути корень–лист с тем, чтобы добиться балансировки по высоте деревьев при помощи вращения и двойного вращения.

## **Практическая реализация**

Так как максимально сбалансированное по сумме весов дерево не всегда оптимально, но при условии, что дерево сбалансировано и монотонно, среднее время поиска отличается от оптимального на несколько процентов, то для практической реализации изложенных выше теоретических выкладок программно был реализован алгоритм построения почти оптимального дерева  $T$ .

Также программно были реализованы процедуры вращения и двойного вращения для восстановления сбалансированности и монотонности деревьев после удаления/добавления в него вершин  $z$ . Сформированная таким образом подсистема, организующая хранение и быстрый поиск необходимой информации, позволяет управлять процессами обработки новых вершин и отыскания альтернативных вариантов, используя интеллектуальные алгоритмы оптимизации.

## **Заключение**

Разработанные и описанные выше программные процедуры: преобразования неоптимальных деревьев в оптимальные, быстрого поиска информации по деревьям и восстановления сбалансированности деревьев после включения и удаления узлов (вершин) позволяют на каждом этапе проектирования АТК с помощью разработанного математического аппарата минимизировать время выбора и принятия технических решений. Использование такого подхода позволяет придать процессу выбора требуемых вариантов при проектировании сложных систем, таких как АТК, интеллектуальную компоненту, позволяющую ускорить такие внутрисистемные процессы, как добавление, поиск и удаление подсистем в БД и БЗ, что, в конечном счете, ускоряет процесс проектирования АТК и упрощает работу с их структурами.

## **Литература**

1. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А.. Оптимизация проектных решений в САПР автоматизированных технологических комплексов. // Научно-технический вестник СПБ ГИТМО (ТУ). Выпуск 6. Информационные вычислительные и управляемые системы. СПб ГИТМО (ТУ) 2002.. С.127–135.
2. Александров В.В., Горский Н.Д. Алгоритмы и программы структурного метода обработки данных. Л.: Наука, 1983.
3. Сибуя М., Ямamoto Т. Алгоритмы обработки данных / Пер. с япон. М.: Мир, 1986.
4. Алексеев А.В. Интеллектуальные системы принятия проектных решений. Рига, 1997.
5. Нагао М., Катаяма Т., Уэмура С. Структуры и базы данных / Пер. с япон. М.: Мир, 1986.

# НЕКОТОРЫЕ МЕТОДЫ НЕЛИНЕЙНОГО АНАЛИЗА

## В.Б. Киселев

Кратко рассмотрен перспективный метод анализа процессов — метод рекуррентных диаграмм. Уделено внимание реконструкции фазового пространства из одиночного ряда измерений, построению рекуррентных диаграмм и количественному анализу, основанному на их геометрических структурах.

### Введение

Развитие науки и техники ставит перед человечеством все увеличивающееся число вопросов, подлежащих всестороннему изучению. Большинство из уже стоящих перед современной наукой проблем требуют более глубокого понимания зависимостей, имеющихся в Природе. Исследования сложных систем, как природных, так и искусственных, показали, что в их основе лежат нелинейные процессы, тщательное изучение которых необходимо для обеспечения понимания и моделирования сложных систем.

В последние десятилетия набор традиционных (линейных) методик исследования был существенно расширен нелинейными методами, полученными из теории нелинейной динамики и хаоса; многие исследования были посвящены оценке нелинейных характеристик и свойств (скейлинг, фрактальная размерность) процессов, протекающих в Природе. Однако большинство методов нелинейного анализа требуют либо достаточно длинных, либо стационарных рядов данных, которые довольно трудно получить при наблюдении Природы. Более того, было показано, что данные методы дают удовлетворительные результаты для идеализированных моделей реальных систем [1]. Эти факты потребовали разработки новых методик нелинейного анализа данных.

В последние 15 лет развился оригинальный метод, основанный на фундаментальном свойстве диссипативных динамических систем — рекуррентности (повторяемости) состояний, выражющейся в том, что, несмотря на то, что даже самое малое возмущение в сложной динамической системе может привести систему к экспоненциальному отклонению от ее состояния, через некоторое время система стремится вернуться к состоянию, некоторым образом близкому к предыдущему, и проходит при этом подобные этапы эволюции. Такое рекуррентное поведение можно изобразить *рекуррентными диаграммами* (recurrence plots, RP), предложенными Экманном (Eckmann) и др. [2]. Практическое использование этого метода показало его применимость к коротким и нестационарным данным, что повысило его популярность у исследователей. В 1992 году Збилут (Zbilut) и Веббер (Webber) опубликовали работу [3], в которой описали элементы количественного анализа, основанного на рекуррентных диаграммах (recurrence quantification analysis, RQA). В настоящее время количество англоязычных публикаций на тему рекуррентного анализа превысило пять сотен. Следует отметить, что рекуррентные диаграммы имеют не только сугубо исследовательское, но и эстетическое значение, привлекая внимание так же, как и фрактальные рисунки.

В 1998 и 1999 гг. независимо [4,5] были предложены *кросс-рекуррентные диаграммы* (cross recurrence plots, CRP), позволяющие сравнивать две рассматриваемые системы, выявляя состояния подобия.

### Траектории в фазовом пространстве

Состояние природных или искусственных систем обычно изменяется во времени. Изучение этих, как правило, сложных, процессов — важная задача во многих дисциплинах, позволяющая понять и описать сущность этих процессов, например, с распространенной целью прогнозирования их состояния во времени. Целью таких исследований

является нахождение математических моделей, которые бы достаточно соответствовали реальным процессам и могли бы быть использованы для решения поставленных задач.

Состояние системы может быть описано ее переменными состояния

$$x^1(t), x^2(t), \dots, x^d(t), \quad (1)$$

где верхний индекс – номер переменной. Набор из  $d$  переменных состояния во время  $t$  составляет вектор состояния  $\vec{x}(t)$  в  $d$ -мерном фазовом пространстве. Данный вектор перемещается во времени в направлении, определяемом его вектором скорости:

$$\dot{\vec{x}}(t) = \partial_t \vec{x}(t) = \vec{F}(x). \quad (2)$$

Последовательность векторов  $\vec{x}(t)$  образует траекторию в фазовом пространстве, причем поле скорости  $\vec{F}(x)$  касательно этой траектории. Эволюция данной траектории описывает динамику системы и ее аттрактор. Зная  $\vec{F}(x)$ , можно получить информацию о состоянии системы в момент  $t$  путем интегрирования выражения (2). Так как форма траектории позволяет судить о характере процесса – периодические или хаотические процессы имеют характерные фазовые портреты – то для определения состояния системы не обязательно проводить интегрирование, достаточно построить графическое изображение траектории (подробнее см. [6, 7]).

При исследовании сложных систем зачастую либо нет информации обо всех переменных состояния, либо не все из них возможно измерить. Как правило, имеется единственное наблюдение  $u(t)$ , проведенное через дискретный временной интервал  $\Delta t$ . Таким образом, измерения записываются в виде ряда  $u_i(t)$ , где  $t = i \cdot \Delta t$ . Интервал  $\Delta t$  может быть постоянным, однако это не всегда возможно и создает проблемы для применения стандартных методов анализа данных, требующих равномерной шкалы наблюдений.

Взаимодействия и их количество в сложных системах таковы, что даже по одной переменной состояния можно судить о динамике всей системы в целом (даный факт был установлен группой американских ученых при изучении турбулентности). Таким образом, эквивалентная фазовая траектория, сохраняющая структуры оригинальной фазовой траектории, может быть восстановлена из одного наблюдения или временного ряда по теореме Такенса (Takens) методом временных задержек:

$$\hat{\vec{x}}(t) = (u_i, u_{i+\tau}, \dots, u_{i+(m-1)\tau}), \quad (3)$$

где  $m$  – размерность вложения,  $\tau$  – временная задержка (реальная временная задержка определяется как  $\tau \cdot \Delta t$ ). Топологические структуры восстановленной траектории сохраняются, если  $m \geq 2 \cdot d + 1$ , где  $d$  – размерность аттрактора [8]. Оба параметра вложения – размерность  $m$  и задержка  $\tau$  – выбираются априорно.

Существует несколько подходов к выбору минимально достаточной размерности  $m$ ; высокую эффективность показали методы, основанные на концепции ложных ближайших точек (false nearest neighbours, FNN). Суть ее заключается в том, что при уменьшении размерности вложения происходит увеличение количества ложных точек, попадающих в окрестность любой точки фазового пространства. Вытекающий отсюда простейший метод – определение количества FNN как функции от размерности, в пределе равной 0. Существуют и другие методы, основанные на этой концепции – например, определение отношений расстояний между одними и теми же соседними точками при разных  $m$ .

Так как низкая точность измерений и случайные ошибки могут привести к появлению линейной зависимости между последовательными векторами  $\vec{x}(t)$ , то задержку  $\tau$  следует выбирать так, чтобы минимизировать эту зависимость.

В последние годы были разработаны эвристические методы определения лучших размерности и задержки, с использованием RP. Вопросы определения размерности вложения также обсуждаются в работе [9]

### Рекуррентные диаграммы (recurrence plots, RP)

Процессы в Природе обладают ярко выраженным рекуррентным поведением, таким, как периодичность или иррегулярная цикличность. Более того, рекуррентность (повторяемость) состояний в смысле прохождения последующей траектории достаточно близко к предыдущей является фундаментальным свойством детерминированных динамических систем. Это свойство, отмеченное еще в 80-х годах XIX века французским математиком Пуанкаре (Poincare), впоследствии было сформулировано в виде «теоремы рекуррентности», опубликованной в 1890 году:

*Если система сводит свою динамику к ограниченному подмножеству фазового пространства, то система почти наверняка, т.е. с вероятностью, практически равной 1, сколь угодно близко возвращается к какому-либо изначально заданному режиму.*

Как правило, размерность фазового пространства сложной динамической системы более 3, что делает практически неудобным его рассмотрение напрямую (при помощи проекций в 2- и 3-мерные пространства). В 1987 году Экман и др. предложили [2] способ отображения  $m$ -мерной фазовой траектории состояний  $\vec{x}(t)$  на двумерную квадратную двоичную матрицу размером  $N \times N$ , в которой 1 (черная точка) соответствует повторению состояния при некотором времени  $i$  в некоторое другое время  $j$ , а обе координатные оси являются осями времени. Такое представление было названо *рекуррентной диаграммой* (recurrence plot, RP). Математически вышесказанное описывается как

$$\mathbf{R}_{i,j}^{m,\varepsilon_i} = \Theta(\varepsilon_i - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|), \quad \vec{x} \in \mathbb{R}^m, \quad i, j = 1 \dots N, \quad (4)$$

где  $N$  – количество рассматриваемых состояний  $\vec{x}_i$ ,  $\varepsilon_i$  – размер окрестности точки  $\vec{x}$  в момент  $i$ ,  $\|\cdot\|$  – расстояние и  $\Theta(\cdot)$  – функция Хэвисайда.

Поскольку  $\mathbf{R}_{i,i} = 1 (i = 1 \dots N)$  по определению, то RP всегда содержит черную диагональную линию – *линию идентичности* (line of identity, LOI), под углом  $\pi/4$  к осям координат. Произвольно взятая рекуррентная точка  $(i, j)$  не несет какой-либо информации о состояниях во времена  $i$  и  $j$ . Только вся совокупность рекуррентных точек позволяет восстановить свойства системы.

Непрактично и, как правило, невозможно обнаружить полную рекуррентность в смысле  $\vec{x}_i \equiv \vec{x}_j$  (состояние хаотической системы не повторяется полностью эквивалентно начальному состоянию, а подходит к нему сколь угодно близко). Таким образом, рекуррентность определяется как достаточная близость состояния  $\vec{x}_j$  состоянию  $\vec{x}_i$ . Иными словами, рекуррентными являются состояния  $\vec{x}_j$ , попадающие в  $m$ -мерную окрестность с радиусом  $\varepsilon_i$  и центром в  $\vec{x}_i$ . Эти точки  $\vec{x}_j$  называются *рекуррентными точками* (recurrence points) – см. рис. 1.а, на котором показан увеличенный сегмент аттрактора Лоренца. В выражении (4) сказанное описывается функцией Хэвисайда  $\Theta$  и ее параметром  $\varepsilon_i$ .

Существует два подхода к определению параметра  $\varepsilon_i$ , выбор которого зависит от целей и условий применения:

1.  $\varepsilon_i = \varepsilon, \forall i ; \mathbf{R}_{i,j} = \mathbf{R}_{j,i} ;$
2.  $\varepsilon_i \neq \varepsilon ; \mathbf{R}_{i,j} \neq \mathbf{R}_{j,i} .$

Первый является наиболее используемым и приводит к симметричной RP.

Второй означает, что для каждого состояния радиус определяется индивидуально, что приводит к несимметричной RP, но позволяет получить одинаковую плотность рекуррентности каждого столбца RP. В этом случае параметр используется для задания плотности рекуррентности — например, при  $\varepsilon = 0,2$ , выбранном для момента  $i$ , радиус  $\varepsilon_i$  покроет 20% всех векторов фазового пространства. Такой подход называется подходом с *постоянным числом соседних точек* (fixed amount of nearest neighbours, FAN).

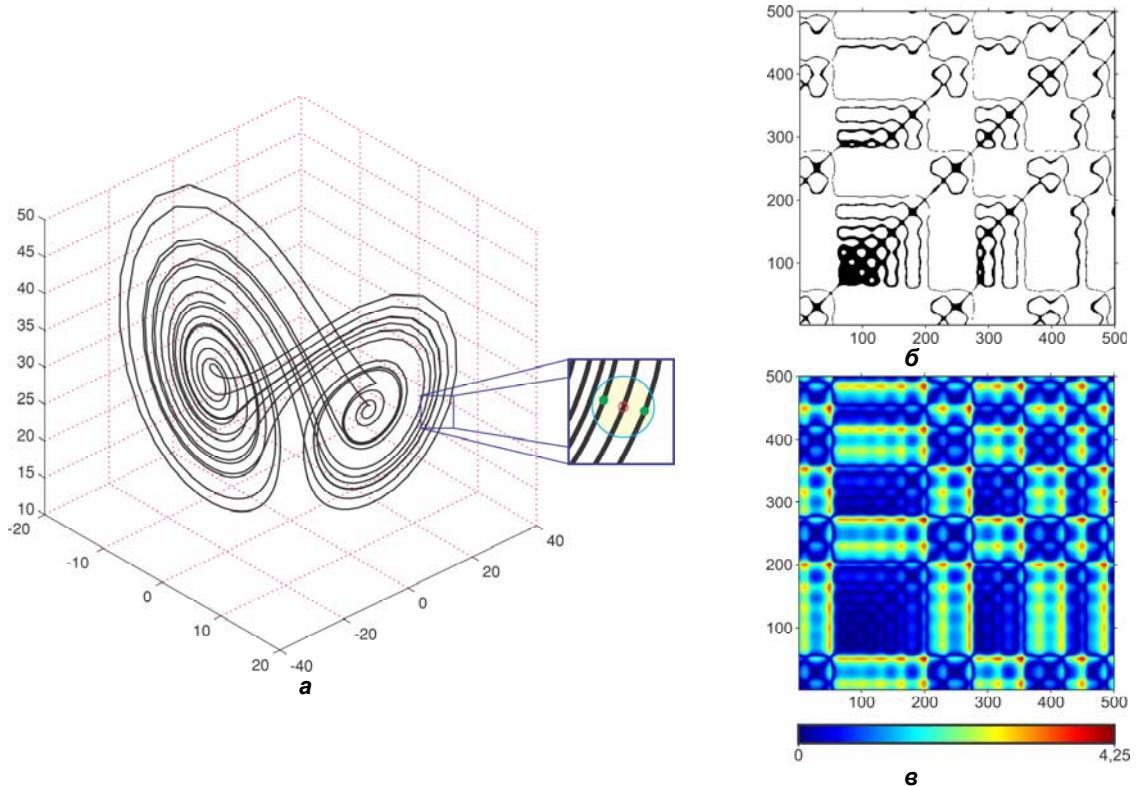


Рис. 1. **а** – сегмент фазового портрета системы Лоренца (ряд получен при  $r = 28$ ,  $\sigma = 10$ ,  $b = 8/3$ ); **б** – рекуррентная диаграмма ( $m = 1$ ,  $\varepsilon = 0,15$ , норма  $L_\infty$ ); **в** – диаграмма расстояний, на которой строится расстояние до ближайшей рекуррентной точки



Рис. 2. Основные нормы с одинаковым радиусом вокруг точки фазового пространства (черная точка), изображенные для двумерного фазового пространства: **а** –  $L_1$ , **б** –  $L_2$ , **в** –  $L_\infty$

Перед расчетом RP также следует уделить внимание выбору нормы. Наиболее известные в данном случае нормы –  $L_1$ ,  $L_2$  (евклидова норма),  $L_\infty$  (максимальная норма). Границы этих норм имеют разные фигуры (см. рис. 2), что применительно к подходу с постоянным  $\varepsilon$  означает, что норма  $L_\infty$  обеспечивает нахождение наибольшего,  $L_2$  – среднего, а  $L_1$  – минимального количества соседних точек. Как правило, при расчете RP используется норма  $L_\infty$ , так как, во-первых, она независима от размерности фазового пространства, во-вторых, наиболее просто вычисляема и, в-третьих, позволяет изу-

чать RP теоретически, поскольку аналитические выражения для  $L_\infty$  решаются проще, нежели для любой другой нормы.

Независимость от размерности находит применение при анализе временных рядов с различными размерностями вложения, т.е. RP разных вложений могут сравниваться напрямую, в то время как для остальных норм требуется масштабирование.

Существует некоторое количество разновидностей RP.

- RP с областью соседства в виде коридора  $[\varepsilon_{in}, \varepsilon_{out}]$  (такие диаграммы неприменимы для количественного анализа) [9]:

$$\mathbf{R}_{i,j}^{[\varepsilon_{in}, \varepsilon_{out}]} = \Theta\left(\|\vec{x}_i - \vec{x}_j\| - \varepsilon_{in}\right) \cdot \Theta\left(\varepsilon_{out} - \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|\right).$$

- Вместо изображения рекуррентности в виде черных точек можно изображать расстояния между состояниями на *диаграмме расстояний* (distance plot) [9, 10], которые отображаются на некоторую цветовую палитру (см. рис. 1.в):

$$\mathbf{D}_{i,j}^m = \|\vec{x}_i - \vec{x}_j\|.$$

- *Оконная рекуррентная диаграмма* (windowed RP) была предложена как средство изучения воздействия внешней силы или нестационарности в системе [11, 12]. Данная диаграмма получается путем покрытия исходной RP квадратами размером  $w \times w$  (окнами) и усреднения значений рекуррентных точек внутри этих окон [11]. Таким образом, оконная RP представляет собой  $N_w \times N_w$ -матрицу, размер которой  $N_w$  вычисляется как округленное в большую сторону отношение  $N/w$ ; данная матрица состоит из значений, не ограниченных 0 и 1 и может быть изображена цветными точками. Эти значения соответствуют кросскорреляционной сумме

$$\mathbf{C}_{I,J}^{m,\varepsilon} = \frac{1}{w^2} \sum_{i,j=1}^w \mathbf{R}_{i+(I-1)w, j+(J-1)w}^{m,\varepsilon}, \quad I, J = 1 \dots \frac{N}{w}$$

между секциями длиной  $w$  и начинающимися в  $(I-1)w+1$  и  $(J-1)w+1$ ;

- Разновидности RP не ограничиваются приведенными. Более обширный их список представлен, например, в работе [13].

Изначальное предназначение RP – зрительный анализ траекторий в фазовых пространствах высоких размерностей; внешний вид диаграммы может дать представление об эволюции этих траекторий во времени. Можно выделить два основных класса структур RP: *топология* (typology), соответствующая крупномасштабным структурам, и *текстура* (texture), соответствующая мелкомасштабным структурам.

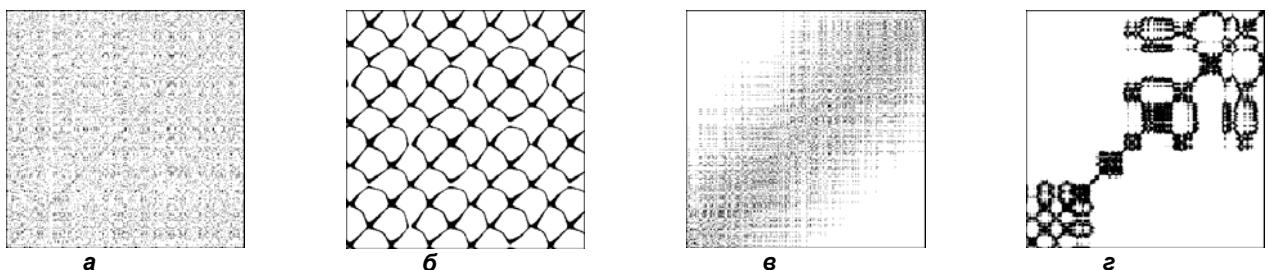


Рис. 3. Характерные топологии RP: *а* – однородная (нормально распределенный шум); *б* – периодическая (генератор Ван дер Поля); *в* – дрейф (отображение Икеды с наложенной линейно растущей последовательностью); *г* – контрастные области или полосы (броуновское движение)

Топология дает общее представление о характере процесса; выделяют четыре различных класса:

- однородные RP типичны для стационарных и автономных систем, в которых время релаксации мало по сравнению с длиной ряда (рис. 3.а);
- периодические повторяющиеся структуры (диагональные линии, узоры в шахматном порядке) соответствуют различным осциллирующим системам (рис. 3.б);
- дрейф соответствует системам с медленно изменяющимися параметрами, что делает белыми левый верхний и правый нижний углы RP (рис. 3.в);
- резкие изменения в динамике системы, равно как и экстремальные ситуации, обуславливают появление белых областей или полос (рис. 3.г). RP упрощает выявление экстремальных и редких событий.

Пристальное изучение RP позволяет выявить мелкомасштабные структуры – текстуру, которая составляется из простых точек, диагональных, горизонтальных и вертикальных линий. Комбинации вертикальных и горизонтальных линий формируют прямоугольные кластеры рекуррентных точек.

- *Одиночные, отдельно стоящие рекуррентные точки* появляются в том случае, когда соответствующие состояния редки, либо неустойчивы во времени, либо вызваны сильной флуктуацией. При этом они не являются признаками случайности или шума.
- *Диагональные линии*  $R_{i+k,j+k} = 1$  (при  $k = 1 \dots l$ , где  $l$  – длина диагональной линии) появляются в случае, когда сегмент траектории пролегает параллельно другому сегменту, т.е. траектория повторяет саму себя, возвращаясь в одну и ту же область фазового пространства в разное время. Длина таких линий определяется временем, в течение которого сегменты траектории остаются параллельными; направление (угол наклона) линий характеризует внутренне время подпроцессов, соответствующих данным сегментам траектории. Прохождение линий параллельно LOI (под углом  $\pi/4$  к осям координат) свидетельствует об одинаковом направлении сегментов траектории, перпендикулярность к LOI – о противоположном («отраженные» сегменты), что может также являться признаком несоответствующего вложения. Нерегулярное появление диагональных линий является признаком хаотического процесса.
- *Вертикальные (горизонтальные) линии*  $R_{i,j+k} = 1$  (при  $k = 1 \dots v$ , где  $v$  – длина вертикальной линии) выделяют промежутки времени, в которые состояние не изменяется или изменяется незначительно (система как бы «заморожена» на это время), что является типичным поведением при ламинарных состояниях.

Рис. 3 показывает, насколько различными могут быть мелкомасштабные структуры. Большое количество отдельных точек и небольшое количество линий – признаки сильных флуктуаций, которые характерны для некоррелированного шума (рис. 3.а). Очевидна зависимость между периодическими повторяющимися структурами и осцилляторами (рис. 3.б). Строгая рекуррентная динамика вызывает появление длинных диагоналей на одинаковом расстоянии друг от друга. Нерегулярное появление коротких и длинных диагональных линий характерно для хаотических процессов (рис. 3.в); при этом нерегулярное появление обширных черных кластеров и обширных белых областей соответствует нерегулярному поведению системы (которая может быть, например, коррелированным шумом, рис. 3.г).

Перечисленные мелкомасштабные структуры лежат в основе количественного анализа рекуррентных диаграмм. Несмотря на достаточно точную классификацию, на практике сигналы отягощены шумами, нередко – весьма значительными, в результате чего анализ RP требует некоторого опыта.

## Количественный анализ рекуррентных диаграмм (recurrence quantification analysis, RQA)

Очевидно, что образуемые структуры рекуррентных диаграмм можно некоторым образом анализировать численно. Впервые элементы количественного анализа рекуррентных диаграмм были предложены в [2] – авторами был разработан инструментарий вычисления мер сложности структур RP, используя плотность рекуррентных точек и диагональных структур. Ряд исследований показал, что эти меры могут использоваться для выявления точек бифуркации и переходов хаос-порядок.

Позднее были предложены меры, использующие плотность вертикальных структур, позволяющие выявлять переходы хаос-хаос и нечувствительные к стационарности и длине исследуемых рядов.

Для вычисления мер используются рекуррентные диаграммы, построенные с фиксированным значением порога  $\varepsilon$ .

Мера *рекуррентность* (recurrence rate,  $RR$ )

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon} \quad (5)$$

показывает плотность рекуррентных точек, просто подсчитывая их, включая LOI. В пределе

$$P_{\bullet} = \lim_{N^2} \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}$$

данная мера показывает вероятность нахождения рекуррентной точки в RP (вероятность повторения состояния).

Следующая мера рассматривает диагональные линии. Частотное распределение длин  $l$  диагональных линий в RP  $P^{\varepsilon}(l) = \{l_i; i = 1 \dots N_l\}$ , где  $N_l$  – абсолютное количество диагональных линий (каждая линия считается только один раз). Процессы со стохастическим поведением могут порождать очень короткие диагонали либо вообще не порождать их, в то время как детерминистские процессы дают длинные диагонали и малое количество отдельных рекуррентных точек. Таким образом, отношение рекуррентных точек, составляющих диагональные структуры, к общему количеству рекуррентных точек

$$DET = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^{\varepsilon}(l)}{\sum_{i,j}^N R_{i,j}^{m,\varepsilon}} \quad (6)$$

называется мерой *детерминизма* (determinism,  $DET$ ) или предсказуемости системы. Следует отметить, что эта мера не имеет значения реального детерминизма процесса. Пороговое значение  $l_{\min}$  исключает диагональные линии, образованные тангенциальным движением траектории в фазовом пространстве. При  $l_{\min} = 1$   $DET \equiv RR$ .

Диагональные структуры показывают время, в течение которого участок траектории подходит достаточно близко к другому участку траектории. Таким образом, эти линии позволяют судить о расхождении элементов траектории. *Средняя длина диагональных линий*

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N l P^{\varepsilon}(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^{\varepsilon}(l)} \quad (7)$$

– это среднее время, в течение которого два участка траектории проходят близко один к другому, и может рассматриваться как среднее время предсказуемости. В RQA, однако, используется *максимальная длина* диагональных структур, либо ее инверсия – *дивергенция* (divergence,  $DIV$ ):

$$L_{\max} = \max(\{l_i; i = 1 \dots N_l\}), \quad DIV = \frac{1}{L_{\max}}. \quad (8)$$

Установлено, что длины диагональных линий соотносятся с наибольшим положительным показателем Ляпунова, если он существует для рассматриваемой системы [2]. Разными авторами были предложены методы оценки максимального положительного показателя Ляпунова с использованием длин диагональных линий.

Мера *энтропии* (entropy, ENTR) соотносится с энтропией Шеннона (Shannon) частотного распределения длин диагональных линий

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l), \quad \text{где} \quad p(l) = \frac{P^{\varepsilon}(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^{\varepsilon}(l)}, \quad (9)$$

и отражает сложность детерминистской составляющей в системе.

*Тренд* (trend, TREND) – мера, представляющая линейный коэффициент убывания частной плотности рекуррентных точек  $RR_*$  диагоналей, параллельных к LOI, как функцию времени (расстояния) между этими диагоналями и LOI

$$TREND = \frac{\sum_{i=1}^{\tilde{N}} (i - \tilde{N}/2) (RR_i - \langle RR_i \rangle)}{\sum_{i=1}^{\tilde{N}} (i - \tilde{N}/2)^2}. \quad (10)$$

Тренд характеризует нестационарность процесса, особенно – дрейф. Выражение исключает границы RP ( $\tilde{N} < N$ ). Выбор значения  $\tilde{N}$  зависит от изучаемого процесса.

Рассмотрим точку траектории  $\vec{x}_i$  и множество ассоциированных с ней рекуррентных точек  $R_i = \{\vec{x}_j : \mathbf{R}_{i,j} = 1; j \in [1 \dots N]\}$ . Определим подмножество этих рекуррентных точек  $r_i = \{\vec{x}_k \in R_i : (\mathbf{R}_{i,k} \cdot \mathbf{R}_{i,k+1}) + (\mathbf{R}_{i,k} \cdot \mathbf{R}_{i,k-1}) > 0; k \in [1, \dots, N] \setminus \{i\}; \mathbf{R}_{i,0} = \mathbf{R}_{i,N+1} = 0\}$ , которое содержит рекуррентные точки, формирующие вертикальные линии на RP в колонке  $i$ . Определим теперь длины  $v$  всех соединенных в  $s_i$  подмножеств  $\{\vec{x}_j \notin s_i; \vec{x}_{j+1}, \dots, \vec{x}_{j+v} \in s_i; \vec{x}_{j+v+1} \notin s_i\}$ . Обозначим  $P_i(v) = \{v_k; k = 1, 2, \dots, K\}$  множество длин присутствующих в  $s_i$  подмножеств, и из выражения  $\bigcup_{i=1}^N P_i(v)$  определяем распределение длин вертикальных линий  $P^{\varepsilon}(v)$  для всего RP в целом.

Мера *замирания* (laminarity, LAM)

$$LAM = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^{\varepsilon}(v)}{\sum_{i,j}^N \mathbf{R}_{i,j}^{m,\varepsilon}} \quad (11)$$

определяется отношением количества рекуррентных точек, образующих вертикальные линии, к общему количеству рекуррентных точек. LAM характеризует наличие состояний замирания системы (т.е. когда движение системы по фазовой траектории останавливается или продвигается очень медленно). Средняя длина вертикальных структур

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^{\varepsilon}(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P^{\varepsilon}(v)} \quad (12)$$

называется мерой *времени остановки* (trapping time, TT) и характеризует среднее время, которое система может провести в определенном состоянии.

Мера *максимальной длины вертикальных структур*

$$V_{\max} = \max(\{v_k; k = 1 \dots K\}) \quad (13)$$

аналогична мере максимальной длины диагональных структур.

Подробнее меры, основанные на анализе вертикальных структур, рассмотрены в [14].

## Заключение

В данной статье была вкратце рассмотрена методика рекуррентных диаграмм (recurrence plots, RP) и количественного анализа на основе их геометрических структур. Не было уделено внимание расширению RP, носящему название кросс-рекуррентных диаграмм (cross-recurrence plots, CRP) [4,5]. Если RP строятся путем оценки расстояний между точками траектории в фазовом пространстве, то при построении CRP оцениваются расстояния между точками  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  двух разных траекторий в одном фазовом пространстве. Аналогично, количественный анализ CRP призван определить меру подобия двух систем.

В последние годы появилось множество работ, посвященных, помимо теоретического изучения RP, еще и вопросам их практического применения. RP активно применяются в геофизике, палеонтологии, медицине (в частности, для оценки сердечной деятельности с целью выявления болезней и предсказания их возможного развития), экономике. Преимущества, предоставляемые данным методом исследователям – одинаковая работа с данными любой размерности, некритичность к источнику и качеству данных, маргинальность (метод не вносит дополнительную информацию «от себя»), наглядность результатов – позволяют применять его достаточно широко при анализе и изучении сложных динамических систем совершенно различной природы.

Следует отметить, что RP сами по себе предоставляют поле для теоретического изучения как их самих, так и получаемых на их основе количественных показателей, так как удовлетворительная теория использования этих показателей при анализе еще не разработана.

## Литература

1. Manuca R., Savit R. Stationarity and nonstationarity in time series analysis. // *Physica D*, 99(2–3), 134–161 (1996).
2. Eckmann J.-P., Kamphorst S. O., Ruelle D. Recurrence Plots of Dynamical Systems. // *Europhysics Letters* 5, 1987, 973–977.
3. Zbilut J. P., Webber Jr. C. L. Embeddings and delays as derived from quantification of recurrence plots. // *Physics Letters A* 171 (3–4), 1992, 199–203.
4. Zbilut J. P., Giuliani A., Webber Jr. C. L. Detecting deterministic signals in exceptionally noisy environments using cross-recurrence quantification. // *Physics Letters A* 246 (1–2), 1998, 122–128.
5. Marwan N. Untersuchung der Klimavariabilität in NW Argentinien mit Hilfe der quantitativen Analyse von Recurrence Plots. Masters Thesis, Dresden University of Technology, 1999.
6. Берже П., Помо И., Видаль К. Порядок в хаосе. О детерминированном подходе к турбулентности. М.: Мир, 1991.
7. Мун Ф. Хаотические колебания: Вводный курс для научных работников и инженеров. М.: Мир, 1990.
8. Takens F. Detecting Strange Attractors in Turbulence. P. 366–381, Springer, Berlin, 1981.
9. Iwanski J. S., Bradley E. Recurrence plots of experimental data: To embed or not to embed? // *Chaos*, 8(4), 861–871 (1998).
10. Webber Jr. C. L. Recurrence Quantification Analysis, 2003. <http://homepages.luc.edu/~cwebber>
11. Casdagli M. C. Recurrence plots revisited. // *Physica D*, 108(1–2), 12–44 (1997).
12. Manuca R., Savit R. Stationarity and nonstationarity in time series analysis. // *Physica D*, 99(2–3), 134–161 (1996).
13. Marwan N. Encounters With Neighbours – Current Developments Of Concepts Based On Recurrence Plots And Their Applications, PhD Thesis, University of Potsdam, ISBN: 3-00-012347-4 (2003). <http://pub.ub.uni-potsdam.de/2003/0026/marwan.pdf>
14. Marwan N., Wessel N., Meyerfeldt U., Schirdewan A., Kurths J. Recurrence-plot-based measures of complexity and their application to heart-rate-variability data. // *Physical Review*, E66, 026702 (2002).

# РАСЧЕТ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЗАЩИЩЕННОСТИ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ ПОДВИЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ

## С.В. Егоров

В данной работе проведен расчет информационной защищенности комплекса управления подвижными объектами. Этот расчет основывается на показателях прочности отдельных средств защиты возможных каналов несанкционированного доступа к информации.

### Введение

При повсеместном внедрении новых информационных технологий и увеличении их влияния на жизнь общества, особо важную роль приобретает проблема информационной безопасности [1, 4].

Для построения надежной информационной защиты необходимо выявить возможные угрозы информационной безопасности и определить меры и средства защиты, но все эти средства могут крайне неэффективно функционировать, если не проводить соответствующую оценку прочности информационной защиты [2]. На основе такой оценки можно сделать корректировки в системе защиты информации, тем самым увеличив эффективность защиты.

В данной работе ставится задача определить возможные каналы несанкционированного доступа к информации (ВК НСД), определить средства защиты этих каналов и оценить информационную защищенность комплекса управления подвижными объектами.

### Объект исследования и возможные каналы несанкционированного доступа

В качестве объекта исследования выступает комплекс управления подвижными объектами (КУПО). Этот комплекс представляет собой автоматизированную систему управления с распределенной обработкой данных, имеющую открытый радиоканал управления подвижным объектом. Схема этого комплекса изображена на рис. 1.

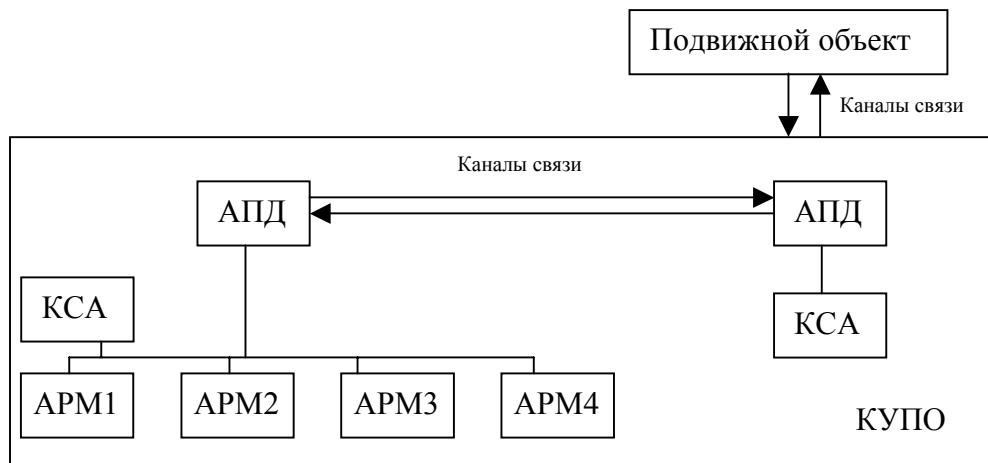


Рис 1. Схема комплекса управления подвижными объектами:  
АПД – аппаратура передачи данных; КСА- комплекс средств автоматизации;  
АРМ – автоматизированное рабочее место

Возможные каналы несанкционированного доступа в КУПО и средства их защиты сведены в таблицу 1 [1–3]. В этой таблице показатели прочности были определены путем экспертной оценки средств защиты для конкретного КУПО.

Таблица 1

№ п/п	Наименование ВК НСД	Средства защиты	Прочность	
			Обозна- чение	Вели- чина
1	Устройства ввода (вывода) информа- ции	Система контроля и разграничения досту- па в помещения.	$P_1$	0,92
		Программно-аппаратный комплекс кон- троля входа в систему.	$P_2$	0,82
		Программа контроля и разграничения доступа к ПО и информации КСА.	$P_3$	0,85
2	Аппаратура ото- бражения и доку- менти-рования ин- формации	Система разграничения и контроля досту- па в помещения	$P_1$	0,92
3	Ремонтируемая и профилактируемая аппаратура	Система разграничения и контроля досту- па в помещения.	$P_1$	0,92
		Система контроля ввода (вывода) аппара- туры в (из) рабочий контур обмена ин- формацией.	$P_4$	0,88
		Средства стирания остатков информации.	$P_5$	0,9
		Средства наложения на остатки инфор- мации случайной последовательности сим- волов и чисел.	$P_6$	0,9
		Средства уничтожения носителей секре- тной информации	$P_7$	0,9
4	Машинные носите- ли информации	Учет и разграничение доступа к носите- лям.	$P_8$	0,84
		Электронная идентификация носителей.	$P_9$	0,92
		Шифрование информации.	$P_{10}$	0,9
		Резервирование информации с охраной ее копии	$P_{11}$	0,86
5	Документы	Учет, регистрация и разграничение досту- па к документам	$P_{12}$	0,84
6	Носители про- грамм-много обес- печения	Учет, регистрация и разграничение досту- па к носителям ПО.	$P_{13}$	0,86
		Верификация и контроль целостности ПО.	$P_{14}$	0,9
		Резервирование ПО с контролем доступа к его копии	$P_{15}$	0,86
7	Машинные носите- ли с остатками ин- формации	Учет, регистрация и разграничение досту- па.	$P_8$	0,84
		Средства стирания информации.	$P_5$	0,9

		Наложение случайной последовательности символов и чисел.	$P_6$	0,9
		Средства уничтожения носителей	$P_7$	0,9
8	Бумажные носители с остатками информации	Средства уничтожения носителей	$P_{16}$	0,9
9	Средства загрузки ПО	Средства контроля и разграничения доступа в помещения.	$P_1$	0,92
		Средства контроля и блокировки доступа к загрузке ПО.	$P_{17}$	0,88
10	Технологические пульты и органы управления, внутренний монтаж аппаратуры	Средства контроля и разграничения доступа в помещения.	$P_1$	0,92
		Система контроля вскрытия аппаратуры	$P_{18}$	0,78
11	Внутренние линии связи между аппаратными средствами КСА	Средства контроля доступа на территорию КУПО.	$P_1$	0,92
		Средства контроля вскрытия аппаратуры.	$P_{18}$	0,78
		Скрытая прокладка линий связи.	$P_{19}$	0,88
		Шифрование передаваемой информации	$P_{20}$	0,9
12	Внешние каналы связи КСА	Программа контроля и разграничения доступа к информации КСА.	$P_{21}$	0,92
		Шифрование передаваемой информации	$P_{22}$	0,9
		Организационные и технические средства защиты целостности канала связи с подвижным объектом	$P_{23}$	0,84
13	Побочное электромагнитное излучение и наводки информации	Средства снижения или зашумления уровня излучения и наводок информации на границе контролируемой зоны объекта автоматизации	$P_{24}$	0,9

Полнота перекрытия перечисленных несанкционированных действий соответствующими средствами будет определять степень замыкания защитного контура. Расчет интегрированного показателя информационной безопасности системы защиты даст общее представление о состоянии защищенности всей системы в целом.

### **Методика расчета информационной защищенности КУПО и полученные результаты**

В соответствии с методикой, описанной в [2] для расчета прочности защиты информации в АСУ, проводился анализ ВК НСД на предмет соответствия их состава и количества заданному классу защиты, разделения их на контролируемые и неконтролируемые, наличие соответствующих средств защиты и возможное их дублирование. Расчет строился исходя из того, что в системе необходимо реализовать защиту по первому классу, т.е. модель нарушителя предполагает, что нарушитель – высококвалифи-

цированный профессионал. Из этого следует, что нарушителю известно абсолютно все о системе защиты, а в самой системе защиты должны функционировать все средства.

В табл. 1 представлены показатели прочности для всех средств защиты. Эти показатели представляют собой общий показатель вероятности непреодоления защиты и необхода средства защиты. В соответствии с табл. 1 к контролируемым средствам предлагается отнести средства со следующими значениями прочности  $P_1, P_2, P_3, P_4, P_8, P_{12}, P_{13}, P_{17}, P_{18}$  и  $P_{21}$ . Для каждого ВК НСД с учетом дублирования средств защиты вычисляется прочность защиты. В нашем случае такой расчет для каналов №№ 1, 3, 9, 10, 11 производится по формуле (1).

$$P_{1\sum} = 1 - (1 - P_{x1})(1 - P_{x2}) \dots (1 - P_{xi}), \quad (1)$$

где  $xi$  – порядковый номер преграды,  $P_{xi}$  – прочность  $xi$ -й преграды. В нашем случае

$$P_{1\sum} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_2)(1 - P_3) = 0,99,$$

$$P_{3\sum} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_4) = 0,99,$$

$$P_{9\sum} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_{17}) = 0,99,$$

$$P_{10\sum} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_{18}) = 0,99,$$

$$P_{11\sum} = 1 - (1 - P_1)(1 - P_{18})(1 - P_{19})(1 - P_{20}) = 0,99.$$

Полученные результаты показывают, что несколько высокопрочных дублирующих средств защиты делают доступ к охраняемой информации через соответствующий ВК НСД практически невозможным.

После сравнения полученных значений выбираем наименьшее из них, которое и будет значением прочности защитной оболочки, образованной данными средствами, т.е. используем формулу

$$P_{3H} = \min\{P_{1\sum}, P_2, P_{3\sum}, P_8, P_{13}, P_{16}, P_{9\sum}, P_{10\sum}, P_{21}\} = 0,86, \quad (2)$$

где  $P_{3H}$  – показатель прочности контролируемой оболочки защиты.

К неконтролируемым можно отнести средства со следующими значениями прочности:  $P_{10}, P_5, P_6, P_7, P_{16}, P_{20}, P_{22}, P_{23}, P_{24}$ . Среди этих средств выбирается средство с наименьшим показателем прочности, т.е используем формулу

$$P_{H3H} = \min\{P_5, P_6, P_7, P_{10}, P_{16}, P_{20}, P_{22}, P_{23}, P_{24}\} = 0,84, \quad (3)$$

где  $P_{H3H}$  – показатель прочности неконтролируемой оболочки защиты, определяемой превентивными средствами защиты.

При сравнении двух интегрированных показателей прочности защиты становится заметно, что преодоление средств защиты нарушителем маловероятно [2], а наиболее просто преодолеваются неконтролируемые средства защиты, особенно средства защиты внешних каналов связи с подвижным объектом.

## Заключение

В данной работе были определены каналы несанкционированного доступа к информации для комплекса управления подвижными объектами и предложены средства защиты каналов от несанкционированного доступа.

По результатам экспертной оценки прочности защиты каждого средства защиты информации был проведен расчет и получен сводный показатель прочности всей системы защиты. Полученный результат показывает, что событие преодоления средств информационной защиты маловероятно.

Среди всех возможных каналов доступа к информации наиболее уязвимым представляется канал связи с внешними объектами, поэтому для улучшения показателя прочности необходимо повысить прочность средств защиты этого канала.

Данная работа позволяет оценить информационную защищенность комплекса управления подвижными объектами и может послужить основанием для внесения изменений в перечень применяемых средств защиты с целью повышения информационной защиты охраняемого объекта.

### **Литература**

1. Корнеев И.Р., Беляев А.В. Информационная безопасность предприятия. СПб: БХВ-Петербург, 2003. 752с.
2. Мельников В.В. Безопасность информации в автоматизированных системах. М.: Финансы и статистика, 2003. 368 с.
3. Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. / 2-е изд. М.: Радио и связь, 2001.
4. Щеглов А.Ю. Защита компьютерной информации от несанкционированного доступа. СПб: Наука и техника, 2004. 384с.

# СТРУКТУРИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛОВ КРЕМНИЯ В ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКЕ

## А.М. Скворцов

Кристаллы вообще и монокристаллы кремния, в частности, обладают идеальной периодичностью в трех измерениях. Появление даже идеальной поверхности (отсутствие механических нарушений, адсорбированных атомов и молекул, посторонних частиц или пленок) разрушает эту периодичность в одном направлении и приводит к структурным изменениям и появлению локализованных электронных и колебательных состояний.

Поверхность кристаллов большинства полупроводниковых материалов содержит структурные перегруппировки атомов по отношению к регулярной упаковке объемной структуры. Например, стабильная структура поверхности монокристалла кремния, совпадающей с главной кристаллографической плоскостью (111), перестраивается в «сверхрешетку» с периодом, в семь раз большим объемного периода решетки [8]. Поверхность имеет двухмерную периодичность, т.е. периодичность в двух направлениях, параллельных поверхности. Естественно, эта периодичность отличается от объемной. Несколько атомных слоев в приповерхностной области будут иметь отклонение от периодичности не только в поверхностной плоскости. Расстояния между слоями по нормали к поверхности будут также отличаться от параметра решетки объема подложки, т.е. структура приповерхностных слоев, согласно [8], может быть обозначена как  $7 \times 7$  по отношению к объемной структуре.

Поверхностная «сверхрешетка» состоит из субплоскостей атомов. Субплоскость же атомов представляет собой атомную плоскость с одним атомом в элементарной поверхностной ячейке. Таким образом, реальная поверхность монокристаллической кремниевой подложки может быть представлена как «пластина», состоящая из субатомных плоскостей. Такая поверхностная структура во многом связана с тем, что уже при комнатной температуре поверхность монокристалла кремния покрыта слоем оксида кремния толщиной от 30 до 40 нм в зависимости от времени его нахождения на воздухе. Элементарная ячейка окисла существенно превышает ячейку кремния, поэтому каждую реальную атомную плоскость следовало бы описывать несколькими субплоскостями. Число таких субплоскостей тем больше, чем больше разница между элементарной ячейкой кремния и элементарной ячейкой пленки на ней.

Из вышеизложенного следует, что даже идеально полированная поверхность кремниевой монокристаллической пластины (полное отсутствие нарушенного слоя на поверхности) является атомарно структурированной. Такое самоструктурирование заключается в образовании на поверхности монокристалла системы субатомных плоскостей, образующих на поверхности «сверхрешетку». Параметры элементарной ячейки этой «сверхрешетки» зависят от химической обработки поверхности и условий естественного роста окисла после химобработки. При последующем термическом окислении эта обработка влияет на формирование структуры как граничного слоя  $\text{Si}/\text{SiO}_2$ , так и окисла [9]. Для получения более совершенной структуры пленок  $\text{SiO}_2$  был разработан метод стационарного термического окисления кремния [10].

### Химическое микроструктурирование поверхности монокристаллов кремния

В настоящее время химическое микроструктурирование (ХМС) широко применяется для создания пространственных поверхностных и объемных структур в монокристаллах кремния. Так, в полупроводниковой микроэлектронике с помощью V-образных канавок формируется изоляция элементов типа VATE и «Полипланар» в полупроводниковых микросхемах. В КМОП СБИС в форме V-образных канавок делаются затворы

МОП-транзисторов. Изоляцию элементов в СБИС осуществляют также с помощью глубоких канавок в монокристаллических кремниевых подложках и с помощью разделительных канавок в БИС на КНС-структурах [11].

Микроструктурирование кремния находит применение даже в таких областях, где кремний используется для выполнения, казалось бы, не свойственных ему функций, например, для создания микромеханических устройств, различных датчиков и преобразователей [12]. В последние годы методы ХМС находят применение в фотонике, например, для создания фотонных кристаллов [13, 14]. При создании микрооптомеханических устройств, в которых поверхности часто используются как оптические отражатели, необходимо получение более гладких зеркальных поверхностей. Решению этой задачи посвящено большое количество работ. Так, в работах [15–18] представлены различные эксперименты по травлению поверхности монокристаллического кремния. В работе [15] приведены результаты травления кремния в KOH в реальном времени, а работы [16–18] посвящены получению гладких поверхностей путем использования разных травителей и различных добавок к ним. Можно предположить, что в скором времени микро- и наноструктурирование поверхности монокристаллов кремния будет использоваться для получения новых композитных материалов для изделий наноэлектроники [19].

### **Микроструктурирование с помощью электрохимического травления**

Электрохимические реакции в системе кремний–электролит заключаются в анодном растворении кремния в электролите при положительном напряжении на кремнии и отрицательном – на катоде. Растворение происходит на локальных участках кристалла, в результате чего образуется пористая структура поверхности. Наиболее распространенным в современной литературе методом формирования пористого кремния (ПК) является метод электрохимического травления пластины монокристаллического кремния в растворе, содержащем плавиковую кислоту. Причем порообразование наиболее эффективно происходит только при анодном травлении, т.е. тогда, когда на пластину монокристаллического кремния подается положительный потенциал относительно электролита, и порообразования практически не происходит в случае обратной полярности [20]. Для кремния *n*-типа проводимости еще одним дополнительным условием формирования пористого кремния является подсветка поверхности пластины Si для генерации свободных дырок в приповерхностном слое образца.

Изменяя условия анодного травления кремния (состав и концентрацию электролита, плотность анодного тока, интенсивность подсветки кремниевого анода), а также кристаллографическую ориентацию кремниевой пластины-анода, тип проводимости и концентрацию примеси, можно в широких пределах регулировать форму и размер пор. В зависимости от размера пор пористый кремний (ПК) подразделяют на микропористый (размер пор  $R$  меньше 2 нм), мезопористый ( $2\text{ нм} < R < 50\text{ нм}$ ) и макропористый ( $R > 50\text{ нм}$ ). Важнейшим параметром любого пористого материала является показатель пористости  $K_p$ , который определяет, какая доля объема материала занята порами. Значения  $K_p$  для пористого кремния меняются в чрезвычайно широких пределах – от 5 до 95%. В зависимости от пористости кремния и морфологии пор в широких пределах меняется и площадь суммарной внутренней поверхности ПК; она может колебаться в пределах от  $10\text{ м}^2/\text{см}^3$  до  $800\text{ м}^2/\text{см}^3$ . Эта сильно развитая поверхность химически очень активна: адсорбирует на поверхности продукты реакции травления, легко окисляется, взаимодействует с веществами, которые могут быть введены внутрь ПК.

Приведенные выше свойства ПК находят широкое применение в различных областях электронной техники. В первую очередь, в семидесятых годах прошлого столетия, его уникальные свойства были использованы в полупроводниковой микроэлектронике.

тронике для диэлектрической изоляции элементов интегральных схем от подложки, высоколегированных областей мощных транзисторов, геттерирования примесей [20]. В начале восьмидесятых годов пористый кремний был применен для выявления электрически активных дефектов в кремнии [21] и определения глубины дефектного слоя на поверхности монокристаллических кремниевых пластин [22].

Открытая Кэнхемом в 1990 году видимая фотолюминесценция пористого кремния и высказанное им предположение о роли квантоворазмерного эффекта в появлении фотолюминесценции [23] вызвали новый повышенный интерес к этому материалу. Появляется огромное количество научных публикаций, посвященных изучению его фундаментальных свойств – структуры, химического состава, квантоворазмерного эффекта, фотолюминесценции и других. Подробное и обстоятельное рассмотрение работ по исследованию характеристик и свойств ПК приведен в обзоре [24]. После 1997 года число публикаций, касающихся пористого кремния, не снижается и, видимо, приближается к  $10^3$  публикаций в год. Наряду с исследованием уникальных свойств ПК большое внимание уделяется вопросам практического применения этих свойств. Разрабатываются электролюминесцентные и фотолюминесцентные структуры на основе ПК, исследуются их характеристики и стабильность параметров во времени. Получены многослойные структуры ПК, в которых каждый слой обладает заданной пористостью и геометрией пор. На основе таких структур для целей интегральной оптики уже получены планарные световоды, что приближает решение задачи по созданию оптоэлектронной интегральной микросхемы на основе ПК.

### Лазерное микроструктурирование поверхности кремния

Лазерное микроструктурирование поверхности кремния (ЛМПК) [25] можно выполнять несколькими методами:

- методом, основанном на локальном испарении (абляции) материала;
- методом, основанном на возникновении поверхностной электромагнитной волны;
- методом, основанном на интерференции двух или трех пучков излучения.

Лазерное микроструктурирование, основанное на испарении (абляции) вещества, отличается универсальностью, управляемостью, производительностью и простотой обработки. Для этой цели могут быть использованы лазеры, создающие при фокусировке излучения плотность мощности  $q$ , достаточную для испарения материала [24]:

$$q = \frac{2kT_u \sqrt{\pi}}{A\sqrt{\alpha\tau}} \approx 10^7 \div 10^8 \frac{Bm}{cm^2}, \quad (1)$$

где  $T_u$  – температура испарения материала,  $k$  – теплопроводность,  $\alpha$  – температуропроводность,  $\tau$  – длительность воздействия,  $A$  – поглощательная способность материала. При характерном пространственном размере микроструктуры  $r_0$ , например, порядка 1 мкм это потребует лазеров с мощностью в импульсе  $P$  всего лишь  $P > q \cdot S = 0,1\text{--}1,0$  Вт ( $S$  – площадь светового пятна,  $S \approx \pi r_0^2$ ).

Толщина испаренного слоя  $h$  при импульсном воздействии с заданной плотностью мощности  $q$  зависит от длительности воздействия  $\tau$ . Ее легко оценить, считая, что вся подведенная к материалу мощность идет на испарение вещества:

$$h = V_u \cdot \tau = \frac{q}{L_u} \tau, \quad (2)$$

где  $V_u$  – скорость испарения вещества (скорость движения границы раздела твердое тело – газ),  $L_u$  – удельная теплота испарения вещества (Дж/см<sup>3</sup>).

Для лазерного микроструктурирования поверхности (ЛМП) могут быть использованы как сфокусированное лазерное излучение, так и спроектированное через маску-трафарет (проекционный метод) [25].

Так, при микроструктурировании в воздухе поверхности монокристаллического кремния (111) сфокусированным пучком фемтосекундного лазера (длина волны 800 нм, длительность импульса 100 фс, частота следования импульсов 1кГц) [26] на поверхности возникают квазиупорядоченные микроструктуры, обладающие высокими фотолюминесцентными свойствами. Высота рельефа микроструктур и соответственно площадь поверхности облученного образца увеличивается с увеличением плотности мощности лазерного излучения и количества импульсов. Микрофотографии, полученные на электронном микроскопе, показывают наличие дендрических наноструктур размером 10–100 нм на поверхности микроструктур.

Одной из причин возникновения подобных структур на облучаемой поверхности может быть неравномерное поглощение излучения на шероховатостях поверхности. Падающее лазерное излучение отражается от боковых поверхности выступов и интенсивно поглощается во впадинах между выступами. Последующие импульсы избирательно удаляют материал между выступами, тем самым создавая конусообразные структуры. Наблюдалось большое содержание кислорода в образцах, обработанных излучением с большой плотностью мощности, что связано с сильным увеличением поверхностной температуры и, соответственно, с большей глубиной расплава.

Подобные же структуры были получены на поверхности монокристаллического кремния под воздействием излучения импульсного лазера на парах меди (длина волны 510,6 нм, длительность импульса 20 нс) [27]. Поверхность кремния, облученная в вакууме, покрыта плотным массивом конусообразных структур расположенных на расстоянии 10–15 мкм. При облучении кремния в воздухе при тех же параметрах лазерного излучения, что и в работе [25], поверхность кремниевых пластин покрыта тонким слоем оксида. Однако при диссоциации оксидной пленки в водном растворе HF обнаруживаются похожие конусообразные структуры, хотя вершины этих структур менее острые. Диссоциация модифицированного слоя кремниевых пластин обнажает конические структуры, выступающие над поверхностью на 20–30 мкм, в то время как расстояние между конусами остается таким же.

Второй метод лазерного микроструктурирования поверхности с помощью поверхностной электромагнитной волны (ПЭВ) заключается в следующем. Падающее лазерное излучение преобразуется в ПЭВ на периодических решетках, в той или иной мере представленных в пространственном спектре случайных шероховатостей реальной поверхности. В оптическом диапазоне длин волн ПЭВ появляются на поверхности металлов (и некоторых полупроводников). При наклонном падении пучка возбуждаемая на резонансной решетке ПЭВ интерферирует с падающей волной, в результате чего формируется новое распределение интенсивности света по поверхности, промодулированное в пространстве параметром резонансной решетки. При достаточной интенсивности излучения такое промодулированное поле вызывает пространственно-неоднородные нагрев, плавление, испарение и другие сопутствующие нагреванию процессы [25]. После окончания воздействия и остывания поверхности новый рельеф закрепляется в виде поверхностных периодических структур [28].

Лазерное микроструктурирование поверхности, основанное на интерференции двух или трех пучков излучения, в некотором смысле напоминает метод, основанный на формировании поверхностных периодических структур. Однако в данном методе модуляция электромагнитного поля на поверхности создается за счет интерференции двух-трех пучков, которые являются производными одного основного пучка. В результате интерференции формируется новое распределение интенсивности света по поверхности. При достаточной интенсивности излучения такое поле вызывает простран-

ственno-неоднородные нагрев, плавление, испарение и другие сопутствующие нагреванию процессы [29] и приводят в конце концов к возникновению поверхностных периодических структур [30].

## Литература

1. Scott Thompson, Mohsen Alavi, Makarem Hussein and ath. 130nm Logic Technology Featuring 60nm Transistors, Low-K Dielectrics, and Cu Interconnects. // Intel Technology Yournal. 2002. V.6. N.2. P. 5–13.
2. Takahashi M., Ohno T., Sakakibara Y., Takayama K. Fullydepleted20-nm SOI CMOSFETs with W-CladGate/Source/Drain layers. // IEEE Transactions on Electron Devices. 2001. Vol.48. № 7б. P. 1380–1385.
3. Мильвидский М.Г., Чалдышев В.В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов. // Физика и техника полупроводников (ФТП). 1998. №5. С. 513–522.
4. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. // ФТП. 1998. №1. С. 3–21.
5. M.V. Zamoryanskaya, V.I. Sokolov, A.A. Sytnikova Formation of silicon nanoclusters in silicon oxide using an electron beam. // Solid State Phenomena. 2001. V. 78–79. P. 349–356.
6. M.V. Zamoryanskaya, V.I. Sokolov, A.P. Kaydash. Formation of Silicon Nanoclusters in Silicate Matrix Using an Electron Beam // Symposium Proceedings. International Semiconductor Device Research Symposium, Dec. 5-7, 2001. Washington, P. 322–325.
7. НИР ТОО-2.2-2261 «Формирование мезоскопических фаз на границе раздела кремний-окисел», 2002 г.
8. Вудраф Д., Делчар Т. Современные методы исследования поверхности. М.: Мир, 1989. 568 с.
9. Заморянская М.В., Плотников В.В., Соколов В.И., Скворцов А.М. Влияние условий термического окисления и предокислительной подготовки поверхности кремния на формирование нанокластеров кремния в системе кремний-двуокись кремния. // Тезисы доклада IV Международной научно-технической конференции «Электроника и информатика – 2002», Москва, МИЭТ, 19-21 ноября 2002. С.115–116.
10. Соколов В.И., Плотников В.В., Скворцов А.М., Фролкова Е.Г., Халецкий Р.А. Особенности термического окисления кремния, обусловленные несоответствием на межфазной границе. // Известия вузов. Электроника. 2002. № 5. С. 17–21.
11. Санин К.В., Скворцов А.М. Технология БИС микропроцессоров и микроЭВМ. Л.: ЛИТМО, 1988. 102 с.
12. Петерсен К.Э. Кремний как механический материал. // Труды института инженеров по электронике и радиоэлектронике. 1982. Т. 70. № 5. С. 5–49.
13. V. Tolmachev, T. Perova, J. Vij, E. Astrova, K. Berwick and R. Moore. 1D photonic crystals based on periodically grooved Si. // Proceeding SPIE. 2003. Vol. 4876. P.196.
14. Пилюгина Ю.А., Скворцов А.М., Толмачев В.А. Химическое микроструктурирование поверхности монокристаллического кремния. // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. № 14. СПб, 2004. С.256–261.
15. Real-time, in-situ microscopic observation of silicon etching in KOH / A.C.Gracias, A.N.Rios // Presented at the XIII Meeting of the Brazilian Vacuum Society, Campinas, Brazil, July 1998. // Published in: Rev. Bras. Aplic. 2000 .Vol. 19. P.27-30.
16. Improved anisotropic deep etching in KOH-solution to fabricate highly specular surfaces / C.Mihalcea, A.Hölz, M. Kuwahara, J. Tominaga, E. Oesterschulze, N. Atoda // Microelectronic Engeneering. 2001. Vol. 57–58. P. 781–786.
17. Study of anisotropic etching of (1 0 0) Si with ultrasonic agitation / Jing Chen, Litian Liu,

- Zhijian Li, Zhimin Tan, Qianshao Jiang, Huajun Fang, Yang Xu, Yanxiang Liu. // Sensors and Actuators A. 2002. Vol.96. P.152–156.
18. Anisotropic etching of silicon in a two-component alkaline solution / E. Vazsonyi, Z Vertesy, A Toth, J Szlufcik // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2003. P 165–169.
  19. Плотников В.В., Заморянская М.В., Соколов В.И., Скворцов А.М. Влияние условий термического окисления и предокислительной подготовки поверхности кремния на формирование нанокластеров кремния в структуре кремний-двуокись кремния. // Тезисы докладов Международной научно-технической конференции «Электроника и информатика», Зеленоград, МИЭТ (ТУ), 2002. Часть 1. С.115–116.
  20. Лабунов В.А., Бондаренко В.П. Пористый кремний в полупроводниковой электронике. // Зарубежная электронная техника. 1978. №15 (185). С.4–36.
  21. Мороз Г.К., Прохоров В.И., Скворцов А.М. Способ выявления электрически активных дефектов в кремнии. //Авторское свидетельство №1111632. Приоритет от 20.12.1982.
  22. Мороз Г.К., Скворцов А.М., Айвазян Г.Е., Петухов Г.А. Способ определения глубины дефектного слоя на поверхности монокристаллических кремниевых пластин n-типа. //Авторское свидетельство №1118223. Приоритет от 06.06.1983.
  23. Canham L.T. Silicon quantum wire array fabrication and chemical dissolution of wafers //Appl. Phys. Rev. 1990. V.57(3). P.1046–1048.
  24. Gullis A.G., Canham L.T. The structural and luminescence properties of porous silicon //Appl. Phys. Rev. 1997, V. 82(3). № 1. P. 909–965.
  25. Вейко В.П., Дышловенко С.С., Скворцов А.М. Лазерное микроструктурирование поверхности кремния. // Научно-технический сборник «Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов». Часть 2. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 138–153.
  26. Veiko V.P. Laser microshaping: Fundamentals, practical application, and future prospects. RIKEN Review №32 (January, 2001), p.11-18.
  27. C. Wu, C. H. Crouch, L. Zhao, E. Mazure. Visible luminescence from silicon surfaces microstructured in air. APPLIED PHYSICS LETTERS VOLUME 81, №11 September 2002, с. 1999-2001.
  28. S.I. Dolgaev, S.V. Lavrishev, A.A. Lyalin, A.V. Simakin, V.V. Voronov, G.A. Shafeev. Formation of conical microstructures upon laser evaporation of solids. Appl. Phys., 2001, A 73, p.177-181.
  29. Либенсон М.Н. Поверхностные электромагнитные волны в оптике. // Соросовский образовательный журнал. 1996. № 11. С. 103–110.
  30. <http://www.wsi.tu-muenchen.de/e25/research/nebel/laser/laser.htm>.

# НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕГРАДАЦИИ МОП-СТРУКТУР ПОД ДЕЙСТВИЕМ $\gamma$ -ИЗЛУЧЕНИЯ

## А.М. Скворцов, Р.А. Халецкий

Рассматриваются особенности деградации электрофизических параметров структур на основе металл-окисел-полупроводник (МОП) при воздействии гамма-излучения  $\text{Co}^{60}$  в зависимости от условий термического окисления. Отмечается, что процессы деградации связаны с эффектами накопления зарядов различных знаков на дефектах границы  $\text{Si-SiO}_2$ .

### Введение

Интегральные микросхемы на основе МОП-структур (металл-окисел-полупроводник) находят широкое применение в современной вычислительной технике, и стойкость к воздействию ионизирующего облучения является одним из основных требований, которые к ним предъявляются. В настоящее время уже имеется большое количество работ по влиянию ионизирующего излучения различного вида, в том числе гамма-излучения, на МОП-структуры [1, 2]. Одним из основных вопросов радиационной стабильности является ее связь с технологией получения термического диоксида кремния. Это связано с тем, что процессы деградации при воздействии гамма-излучения во многом определяются структурными и электрофизическими особенностями границы раздела  $\text{Si-SiO}_2$  [2, 3].

На сегодняшний день не существует однозначной зависимости между режимами термического окисления (состав окислительной среды, температура и время окисления) и характером изменения электрофизических параметров МОП-структур при воздействии гамма-излучения. Это обстоятельство и явилось причиной данного исследования, суть которого заключалась в установлении связи между особенностями кинетики деградации электрофизических параметров МОП-структур при гамма-облучении и технологией термического окисления, а также сопоставлении полученных результатов с известными.

### Особенности эксперимента

Подготовка экспериментальных образцов производилась путем термического окисления монокристаллического кремния 76 КЭФ 7,5 (100), выращенного по методу Чохральского, в различных технологических условиях. Верхний электрод (на  $\text{SiO}_2$ ) состоял из композиции: Si-поликристаллический, легированный фосфором, и алюминий. Перед проведением процесса термического окисления подложки предварительно обрабатывались в перекисно-аммиачном растворе и смеси Каро. Термическое окисление производилось с добавками хлора методом барботирования через 33% водный раствор  $\text{HCl}$ . В табл.1 представлены технологические особенности термического окисления.

№ об-разца	Толщина окисла, нм	Продолжительность термического окисления, мин				Температура окисления, $^{\circ}\text{C}$	Напряжение плоских зон $U_{\text{ПЗ}}$ , В
		В сухом $\text{O}_2$	В парах воды	В сухом $\text{O}_2$	Суммарное время		
1	80	10	100	10	120	850	-1,5
2	120	90	-	-	90	1050	-3,5
3	120	10	18	10	38	1000	-1
4	150	120	-	-	120	1050	-4,25

Табл.1. Технологические особенности получения экспериментальных образцов

Экспериментальные структуры подвергались воздействию гамма-облучения  $\text{Co}^{60}$  с мощностью дозы 0,25 Мрад/час. После каждого этапа облучения длительностью 2 часа измерялись высокочастотные вольт-фарадные характеристики (ВФХ). По смещению по оси напряжений ВФХ после облучения относительно ВФХ до облучения на уровне емкости плоских зон определялся сдвиг напряжения плоских зон  $\Delta U_{\text{ПЗ}}$ . При этом направление сдвига  $U_{\text{ПЗ}}$  характеризует знак фиксированного заряда в окисле, вызывающего этот сдвиг, а модуль  $|\Delta U_{\text{ПЗ}}|$  пропорционален его величине [4].

### Результаты эксперимента

На рис. 1 представлена кинетика изменения сдвига напряжения плоских зон  $\Delta U_{\text{ПЗ}}$  при  $\gamma$ -облучении. Наблюдается одинаковый характер изменения  $\Delta U_{\text{ПЗ}}$ , который заключается в том, что при достижении некоторой дозы облучения почти прекращается изменение  $\Delta U_{\text{ПЗ}}$  (насыщение). Наибольшее значение заряда, индуцированного гамма-облучением, судя по  $\Delta U_{\text{ПЗ}}$  при дозе около 7 Мрад, наблюдается для окислов, полученных в сухом кислороде. Для окислов, выращенных по схеме комбинированного окисления (сухой  $\text{O}_2$  – пары воды – сухой  $\text{O}_2$ ), наблюдается меньшее по сравнению с «сухим» диоксидом кремния значение радиационно-индукцируемого заряда (РИЗ).

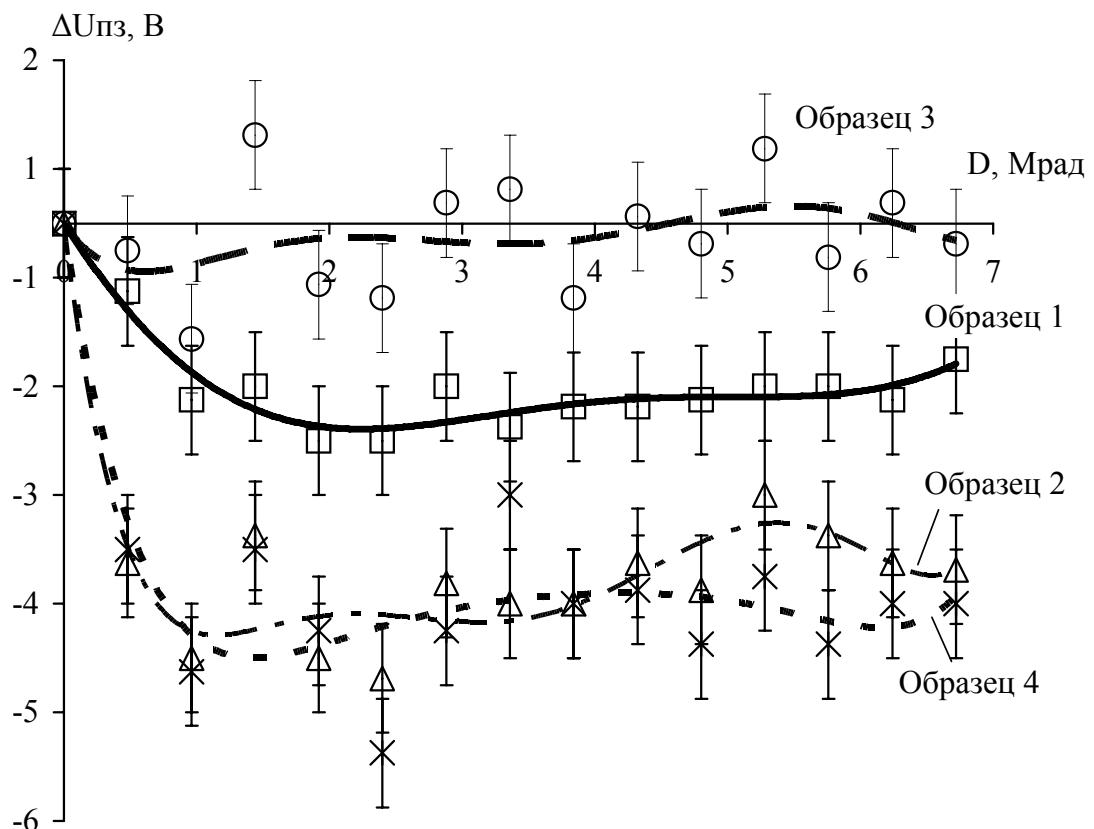


Рис. 1. Типичные зависимости изменения напряжения плоских зон  $\Delta U_{\text{ПЗ}}$  от дозы гамма-облучения  $D$  для экспериментальных МОП-структур (нумерация образцов 1, 2, 3, 4 – согласно табл. 1)

Из графиков на рис. 1 видно, что гамма-облучение индуцирует отрицательный заряд в окисле всех образцов. Этот факт является интересным результатом, так как ранее появление отрицательного РИЗ, причем при различных вариациях режимов термического окисления, не наблюдалось. Однако авторы работы [5] показывают, что иногда при использовании хлора в процессе выращивания окисла в системе  $\text{Si}-\text{SiO}_2$  после

окисления (без дополнительных высокоэнергетических воздействий) может появляться отрицательный заряд. Авторы [5] связывают появление этого отрицательного заряда с эффектами сегрегации хлора на границе раздела Si-SiO<sub>2</sub>. Это приводит к появлению чужеродных акцепторов, вероятность заряжения которых велика по сравнению с немостиковыми атомами кислорода, ответственными за положительный заряд, из-за различия их сродства к электрону  $V$ : для хлора значение  $V$  составляет 3,8эВ, для немостикового кислорода  $V=1,5$ эВ.

Таким образом, можно предположить, что в системе кремний-окисел при генерации электронно-дырочных пар, вызванной гамма-облучением, происходят одновременные процессы заряжения акцепторных центров электронами и донорных – дырками. При этом акцепторные центры обусловлены хлором [5], а донорные центры – такими дефектами в системе Si-SiO<sub>2</sub>, как немостиковый кислород и трехкоординированный атом кремния [1–3].

В итоге результирующее значение РИЗ в окисле  $Q$  можно определить следующим образом:

$$Q = Q_D + Q_A, \quad (1)$$

где  $Q_D$  – суммарный заряд заряженных доноров ( $Q_D > 0$ ), а  $Q_A$  – суммарный заряд заряженных акцепторов ( $Q_A < 0$ ) в переходном слое. При этом понятно, что значения зарядов  $Q_D$  и  $Q_A$  пропорциональны концентрации соответствующих центров. В результате разность концентраций заряженных доноров и акцепторов и определяет значение РИЗ в окисле. Эта разность, в нашем случае, является минимальной для образца, полученного по комбинированной схеме при температуре 1000 °C, и максимальной для образцов с сухим окислом при 1050 °C.

Таким образом, целенаправленно изменяя среду окисления и одновременно корректируя остальные параметры этого процесса, можно добиться взаимной компенсации положительного и отрицательного РИЗ при гамма-облучении, тем самым решив вопрос радиационной стойкости.

## Литература

1. Ringel H., Knoll M., Braunig D., Fahrner W.R. Charges in metal-oxide-semiconductor samples of various technologies induced by <sup>60</sup>Co- $\gamma$  and x-ray quanta. // J. Appl. Phys. 1985. V. 57. № 2. P. 393–399.
2. Гуртов В.А. Радиационные процессы в структурах металл-диэлектрик-полупроводник: Учебное пособие. Петрозаводск, 1988. 96 с.
3. Васильева Е.Д., Колотов М.Н., Нахимович М.В., Соколов В.И. Зарядовые состояния переходной области Si-SiO<sub>2</sub> при радиационной и термополевой обработке. // Микроэлектроника. 2000. Т 29. №1. С. 27–31.
4. Зи С. Технология СБИС. В 2-х кн. Кн. 1. М.: Мир, 1986. 404 с.
5. Романов О.В., Урицкий В.Я., Яфясов А.М. Влияние факторов формирования структуры Si-SiO<sub>2</sub> на ее электрофизические свойства. // Поверхность. Физика, химия, механика. 1983. № 6. С. 70–76.

# ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРИОДИЧЕСКИХ СТРУКТУР ГЛУБОКИМ АНИЗОТРОПНЫМ ТРАВЛЕНИЕМ ДЛЯ ОПТО-И МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

## Ю.А. Пилюгина, А.В. Смелова

### Введение

Данная работа посвящена получению периодических структур на основе щелевого кремния для интегральных фотонных схем. Такие структуры представляют собой одномерные фотонные кристаллы (1D PC – one-dimensional photonic crystals). 1D PC могут быть получены в виде структур с чередующимися слоями, обладающими высоким и низким показателями преломления  $n_{выс}$  и  $n_{низ}$ , оптимальное соотношение оптических толщин которых  $\lambda/4$ , где  $\lambda$  – заданная длина волны. Такие структуры давно известны [1] и хорошо изучены в когерентной и нелинейной оптике, носят название брэгговских и используются для изготовления высокоотражающих зеркал для лазерной техники. Однако как традиционные технологии нанесения тонких пленок, так и новая, основанная на создании слоев микропористого кремния с различной пористостью путем электрохимического травления, не позволяют получить высокий контраст по показателю преломления  $n_{выс}/n_{низ}$ , в то время как высокий контраст является важным параметром фотонных кристаллов. Он дает возможность сократить число слоев, необходимых для формирования широкой запрещенной зоны с резкими краями, а также обладает преимуществами при создании композитных материалов, поскольку введение наполнителя с  $n > 1$  уменьшает контраст [2].

1D PCs бывают двух типов: те, в которых свет распространяется вертикально – различные диэлектрические зеркала, и те, в которых свет распространяется горизонтально, т.е. в плоскости пластины (рис. 1, 2). Более перспективным и интересным является получение 1D PC с распространением света в горизонтальном направлении. Технология их получения совместима с полупроводниковой технологией и позволяет получать различные чипы микросхемы в одном технологическом цикле.

Целью настоящей работы является разработка технологии получения периодических структур на основе щелевого кремния – 1D PC – глубоким анизотропным травлением. С помощью анизотропного травления в кремнии создаются глубокие узкие канавки, стенки которых представляют собой оптически гладкие плоскости (111). Такие структуры являются одномерными фотонными кристаллами, запрещенная зона для фотонов у которых лежит в средней ИК области спектра.

Преимуществами такого фотонного кристалла является:

- возможность распространения света, воздействующего на структуру, в горизонтальном направлении;
- высокий контраст показателей преломления  $n_{Si}/n_{air}=3.42$ ;
- совместимость с кремниевой технологией;
- возможность заполнения жидким кристаллом (ЖК) (рис.1) и другими материалами – получение композитных фотонных кристаллов.

Идея о заполнении пустот периодических структур на основе материалов с более высоким по сравнению с воздухом показателем преломления жидкими кристаллами (ЖК) с целью изменять показатель преломления ЖК и тем самым управлять положением фотонной зоны (photonic band gap PBG – запрещенная фотонная зона) была впервые высказана в теоретической работе [3]. Эксперименты по инфильтрации ЖК в макропористый кремний показали, что PBG сдвигается в длинноволновую часть спектра, а при нагреве за счет перехода ЖК из мезофазы в изотропное состояние был получен сдвиг коротковолнового края PBG [4]. Таким образом, получаемые композитные структуры

являются управляемыми фотонными кристаллами – перспективными для применения в оптоэлектронике.

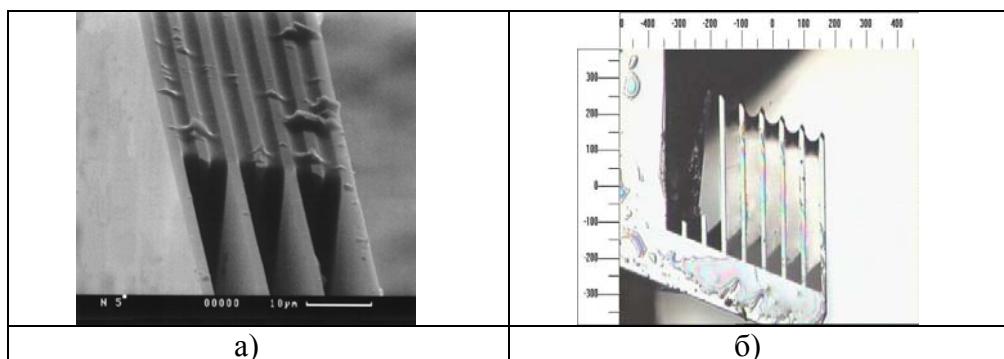


Рис. 1. Пример 1D PCs, заполненных ЖК: а) встречно-штыревая структура с ЖК; б) сквозная структура с ЖК

### Получение периодических структур – 1D PC

Такие структуры (рис. 2) изготавливаются с помощью глубокого анизотропного травления кремниевых пластин *n*-типа с удельным сопротивлением 10 Ом·см, ориентированных в плоскости (110).

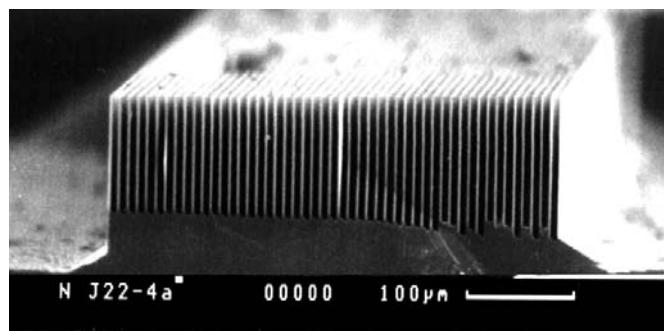


Рис. 2. Пример периодической структуры, полученной глубоким анизотропным травлением кремния

Эти структуры изготавливаются по технологическому процессу, описанному ниже.

**Очистка кремниевых пластин** служит для удаления загрязнений на различных стадиях изготовления структур. Удаляются как механические загрязнения (пыль, абразивные и металлические частицы и т.д.), так и органические загрязнения. Используемый в работе способ очистки пластин состоит в следующем:

- кипячение пластин в диметилформамиде в течение 5–7 минут. Используется для обезжиривания поверхности;
- промывка деионизованной водой;
- кипячение в перекисно-аммиачном растворе ( $\text{NH}_4\text{OH} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 2 : 4$ ), проводится 7–10 минут. Используется для удаления мономолекулярного слоя органических загрязнений примесей ионов или ионов металлов *n*-типа;
- промывка в деионизованной воде;
- очистка в растворе плавиковой кислоты ( $\text{HF} : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1$ ). Проводится с целью снятия естественного окисла кремния с поверхности;
- промывка в деионизованной воде;
- кипячение в кислотно-перекисном растворе ( $\text{HCl} : \text{H}_2\text{O}_2 : \text{H}_2\text{O} = 1 : 1 : 3$ ). Используется как финишная очистка от органических загрязнений.

**Окисление пластин перед первой фотолитографией.** В нашей работе формируемый окисел служит маскирующим покрытием при анизотропном травлении. По экспериментальному графику зависимости скоростей травления оксида кремния и самого кремния от концентрации щелочи, используемой при анизотропном травлении, выбираем необходимую толщину окисла. Затем по графику зависимости роста толщины окисла от времени и температуры окисления при нормальном давлении (рис. 3) выбираем режим окисления.

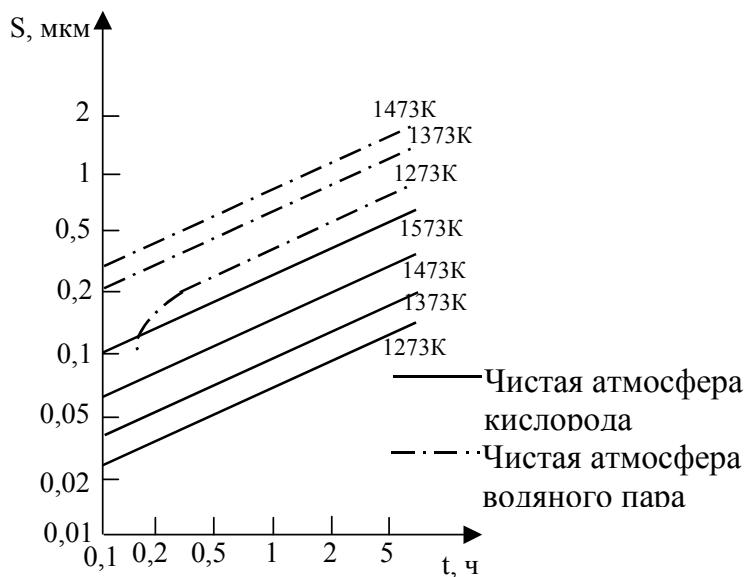


Рис. 3. Зависимость роста толщины  $S$  окисла от времени  $t$  и температуры при нормальном давлении

Таким образом, выбранный нами режим окисления – в атмосфере водяного пара при температуре 1100°C в течение 40 минут. При этом образующийся слой окисла составил  $\approx 0,7\text{--}0,8$  мкм (толщина окисла измерялась на эллипсометре компенсационного типа ЛЭФ-3М).

**Первая фотолитография.** Фотолитография – это совокупность фотохимических процессов, в которых можно выделить три основных этапа: формирование на поверхности материала слоя фоторезиста; передача изображения с шаблона на этот слой (экспонирование); формирование конфигурации элементов устройств с помощью маски фоторезиста [5]. В работе используется позитивный фоторезист – ФП-9120-1.

Фотолитография проводится на поверхности, покрытой окислом. В состав оксида может входить структурная вода в виде силанольных групп OH и присутствовать на поверхности окисла в виде молекул. Для удаления влаги перед нанесением фоторезиста поверхность подложки подвергается отжигу. Отжиг проводится при температуре 80°C в течение 10–15 минут.

Нанесение фоторезиста осуществляется центрифугированием. При включении центрифуги фоторезист растекается под действием центробежных сил. Этот метод нанесения и свойства фоторезиста ФП-9120-1 позволяет формировать резистивный слой толщиной  $\approx 1$  мкм. Толщина резистивного слоя важна при формировании рисунка. На тонких слоях фоторезиста легче получить структуры малых размеров. Время вращения центрифуги 40 с. Для формирования равномерного слоя фоторезиста была выбрана частота вращения центрифуги 3000 об/мин. После нанесения фоторезиста на рабочую сторону сушка проводится при температуре 88°C, в течение 50–55 минут.

**Совмещение.** Фотошаблон, используемый при первой фотолитографии, содержит рисунок специальных знаков совмещения. Эти знаки представляют собой 4 серии окон (рис. 4), расположенных попарно под углом 70,5°. Каждое окно состоит из 180 по-

лос шириной 5 мкм и длиной 3 мм, расположенных радиально через каждые 6 угловых минут. В результате травления из 180 элементов останется приблизительно 20, среди которых нерастворенными в боковом направлении сохранится 2–3 элемента. Остальные полностью исчезнут из-за сильного бокового подтрава.

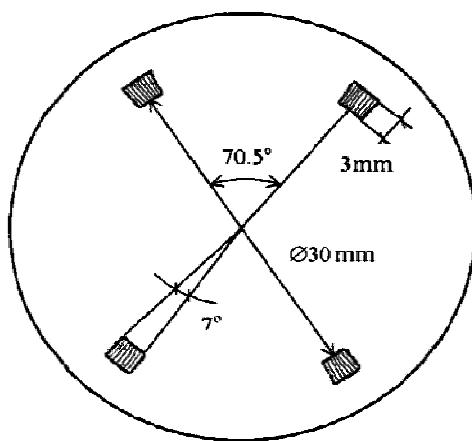


Рис. 4. Схема расположения знаков совмещения, используемых для прецизионной ориентации рисунка фотошаблона вдоль следа плоскостей (111), и схематичное изображение одной из меток

**Экспонирование, проявление и удаление фоторезиста.** Экспонирование осуществляется в течение 39 секунд, время подобрано таким образом, чтобы обеспечить достаточную точность передачи размеров изображения при дальнейшем проявлении, т.е. процессы экспонирования и проявления непосредственно связаны друг с другом.

Проявление осуществляется в слабом растворе щелочи (0.66% KOH). После проявления проводится задубливание. Целью является восстановление набухшей в проявителе пленки фоторезиста и приданье ей устойчивости к последующим воздействиям. Дубление проводится при температуре 120°C в течение 20–25 минут в термостате. Важно не превышать выбранные параметры сушки – время и температуру, так как это ведет к оплыванию краев фоторезиста и, как следствие, к размытию рисунка.

Следующая операция – буферное травление – проявление рисунка в окисле. При буферном травлении в окнах, свободных от резиста – незащищенных – растворяется окисел. В качестве буферного травителя используется смесь следующего состава: 5 мл. HF + 18 г. NH<sub>4</sub>F + 27 мл. H<sub>2</sub>O.

Наконец, фоторезист полностью удаляется с поверхности. Удаление пленки фоторезиста происходит в теплом диметилформамиде ((CH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>NCOH). Затем осуществляется контроль под микроскопом.

**Анизотропное травление меток совмещения.** На основании литературных данных по анизотропному травлению [5] нами были выбраны следующие параметры процесса:

1. травление производится в 44%-ном растворе щелочи KOH;
2. температура раствора 70°C;
3. время травления 2 часа 30 минут.

В результате травления на пластине формируются метки совмещения – 2–3 полосы, которые не растворились и длинные стороны которых параллельны следу плоскостей (111) в плоскости (110).

Затем с пластины необходимо снять окисел, который служил маской при травлении. Для проведения второй фотолитографии создается новый окисел.

Далее осуществляется промывка, описанная в пункте выше.

**Второе окисление под вторую литографию.** Окисление происходит подобно процессу первого окисления под первую литографию.

**Вторая фотолитография.** Нанесение резиста происходит как в пункте выше. Наносится резист той же марки – ФП 9120-1, лишь немного увеличивается частота вращения центрифуги при нанесении резиста – до 3500–3700 оборотов/минуту. Такая частота позволяют сформировать более тонкий слой резиста (менее 1 мкм), в котором в дальнейшем можно будет сформировать мелкий рисунок.

Совмещение рисунка фотошаблона с пластиной осуществляется при второй фотолитографии по рисунку знаков совмещения, сформированных при первой фотолитографии. Производится сначала грубое визуальное, а затем с помощью двухпольного микроскопа – точное совмещение. Точность ориентации вытравливаемого рельефа относительно осей кристалла для кремния (110) должна составлять несколько минут во избежание сильного бокового раstra. Формируемые канавки своей длинной стороной должны быть прецизионно сориентированы параллельно следу плоскостей (111) в плоскости (110) [6].

Фотошаблон для второй фотолитографии содержат различные приборные структуры, состоящих из чередующихся темных и светлых полос равной ширины.

Затем проводится буферное травление рисунка и удаление фоторезиста.

**Глубокое анизотропное травление.** Травление производится в 44%-ном растворе KOH при температуре 70°C, по времени травление длится от 30 минут до 3 часов. Время варварится в зависимости от того, на какую глубину запланировано проравить структуры. Приблизительная скорость травления составляет 35–40 мкм в 30 мин в свежем растворе. Скорость травления зависит от «старения» раствора, поэтому при каждом травлении лучше использовать свежий раствор – легче контролировать скорость, а значит, и глубину получаемых структур.

Следует отметить, что получение приборов с малым периодом ограничивается боковым подтравом и механической прочностью кремниевых стенок. Утоньшение стенок происходит как за счет бокового подтрава под фоторезист в буферном травителе на этапе вскрытия окон в окисле, так и за счет некоторого отклонения от вертикали при глубоком анизотропном травлении кремния.

После глубокого анизотропного травления и снятия с пластины оксида кремния мы получаем готовые структуры.

### Измерение экспериментальных образцов

Получаемые 1D PCs исследовались на Фурье-спектрометре на отражение и пропускание (рис. 5). Были получены хорошие соответствия расчетных и экспериментальных спектров (рис. 6). Расчеты спектров проводились в математическом пакете программ MathCad, для каждой структуры строился расчетный спектр, который потом со-поставлялся с экспериментом.

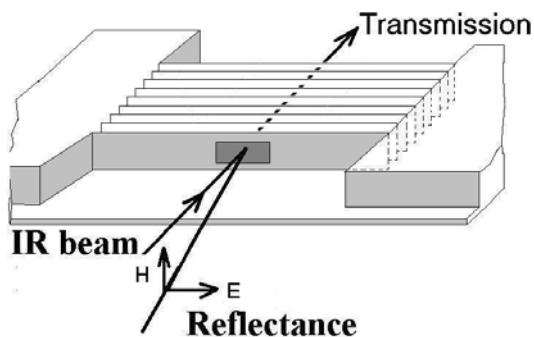


Рис. 5. Схема измерения спектров одномерного фотонного кристалла

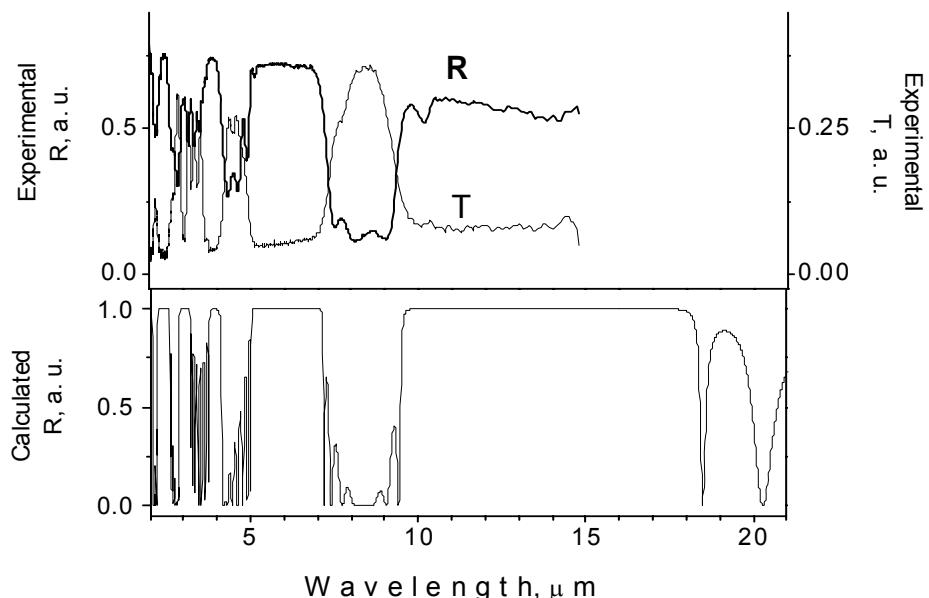


Рис.6. Экспериментальные и расчетные спектры отражения (R) и пропускания (T) одномерного фотонного кристалла

### Выводы

1. Изготовленные одномерные планарные фотонные кристаллы на основе кремния с различными периодами от 16 до 2 мкм годны для использования в среднем и дальнем инфракрасном диапазоне спектра.
2. Измерены спектры отражения и пропускания в диапазоне длин волн  $\lambda=1.5-15$  мкм, показано хорошее соответствие между расчетными и экспериментальными данными, что указывает на высокое качество полученных структур.

### Литература

1. Денисюк Ю.Н. Об отображающих свойствах волновых полей. // ДАН СССР. 1962. Т. 144. С. 1275–1278.
2. Одномерный фотонный кристалл, полученный с помощью вертикального анизотропного травления кремния / В.А. Толмачев, Л.С. Границына, Е.Н. Власова, Б.З. Волчек, А.В. Нащекин, А.Д. Ременюк, Е.В. Астрова // Физика и техника полупроводников. 2002. Том.36. Вып. 8. С. 996–999.
3. K. Bush and S. John // Phys. Rev. Lett.. 1999. V.83. P. 967–970.
4. Ременюк А.Д., Астрова Е.В., Витман Р.Ф., Т.С. Перова, Толмачев В.А., J.K. Vij. Исследование ориентации жидкокристаллической смеси E7 в композитных фотонных кристаллах на основе монокристаллического кремния. В печати.
5. Vertical etching of silicon at very high aspect ratios / Kendall Don L. // Annual Review Materials Science. 1979. Vol. 9. P.373 – 403.
6. Кремниевые структуры с диэлектрической изоляцией, полученные вертикальным анизотропным травлением / Гук Е.Г., Ткаченко А.Г., Токранова Н.А., Границына Л.С., Астрова Е.В., Подлакин Б.Г., Нащекин А.В., Шульпина И.Л., Рутковский С.В. // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 9. С.64–71.

# ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ КРЕМНИЕВОГО КОМПОЗИТА С АКТИВНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ

## Е.В. Овечкина

Целью настоящей работы является создание кремниевого композита с активными диэлектрическими свойствами, совместимого с существующей кремниевой технологией в микроэлектронике.

Растущие потребности новой приборной техники придают актуальность разработке высокоеффективных сегнетоэлектрических материалов и совершенствованию технологий их производства. Обе эти задачи непосредственно связаны с успехами в решении фундаментальной проблемы материаловедения сегнетоэлектриков – определения закономерностей формирования физических свойств сегнетоэлектрических материалов и возможностей управления этими свойствами с помощью внешних воздействий. Среди таких свойств в последние годы стали актуальными электрооптический эффект, большая анизотропия пьезоэффекта, электронная эмиссия под воздействием электрических полей и др.[1]

Необходимо было создать композит на основе термически окисленного микропорошка кремния и сегнетоэлектрика. В данном случае в качестве сегнетоэлектрика был взят титанат бария. Полученный композит должен быть призрачен в ближнем (1,2–3 мкм) и среднем (3–5,5 мкм) инфракрасном излучении. Этот композит будет входить в состав пироэлектрического датчика инфракрасного излучения, совместимого с существующей толстопленочной технологией. Под активными диэлектрическими свойствами подразумевается наличие хорошо выраженных пироэлектрических свойств и целенаправленно уменьшенных пьезосвойств.

В технологии был использован микропорошок кремния, полученный в процессе измельчения в шаровой мельнице, и порошок титаната бария, полученный из металлогранических соединений с помощью газотранспортных реакций в кварцевом реакторе. Микропорошки для получения более мелких фракций частиц отмучивались в деионизованной воде. Для кремния мы получаем 4 вида суспензии с разной фракцией размера частиц порошка. Также получены суспензии трех видов с разным процентным содержанием сегнетоэлектрика. Далее происходит стандартная подготовка пластин к процессу окисления – очистка от существующих загрязнений (атомарных, жировых, механических, органических).

Полученная суспензия наносится на пластины микродозатором, так как размер образцов для электронного микроскопа не должен превышать 4 мм. Заключительный процесс в данной технологии – это процесс окисления пластин в диффузионной печи при температуре 900 °С в течение одного часа на атмосфере. Пластины загружались уже в разогретую печь и вынимались сразу по истечении времени окисления. Полностью технология получения образцов представлена на рис.1.

С полученных структур были сняты статические (рис. 2) и динамические (рис. 2, 3) вольт-амперные характеристики (ВАХ). В данной работе представлены статические ВАХ для образцов, где в суспензии присутствует только микропорошок кремния с разной фракцией частиц (образец №1 – размер 1,4 мкм, образец №2 – размер 1 мкм, образец №3 – размер 0,5 мкм, образец №4 – 0,15 мкм).

При уменьшении размера частиц исходного микропорошка кремния происходит трансформация формы частиц. Нельзя считать, что преобладающая форма частиц – шарообразная. По данным проведенных микроскопических исследований, форма частиц приближается к игольчатой. На поверхности микрочастиц кремния неправильной формы присутствуют острые углы. В связи с этим с уменьшением размера частиц происхо-

дит резкое увеличение локальной напряженности поля вблизи острый (углов), т.е. ток начинает увеличиваться при разном приложенном напряжении [2–4].

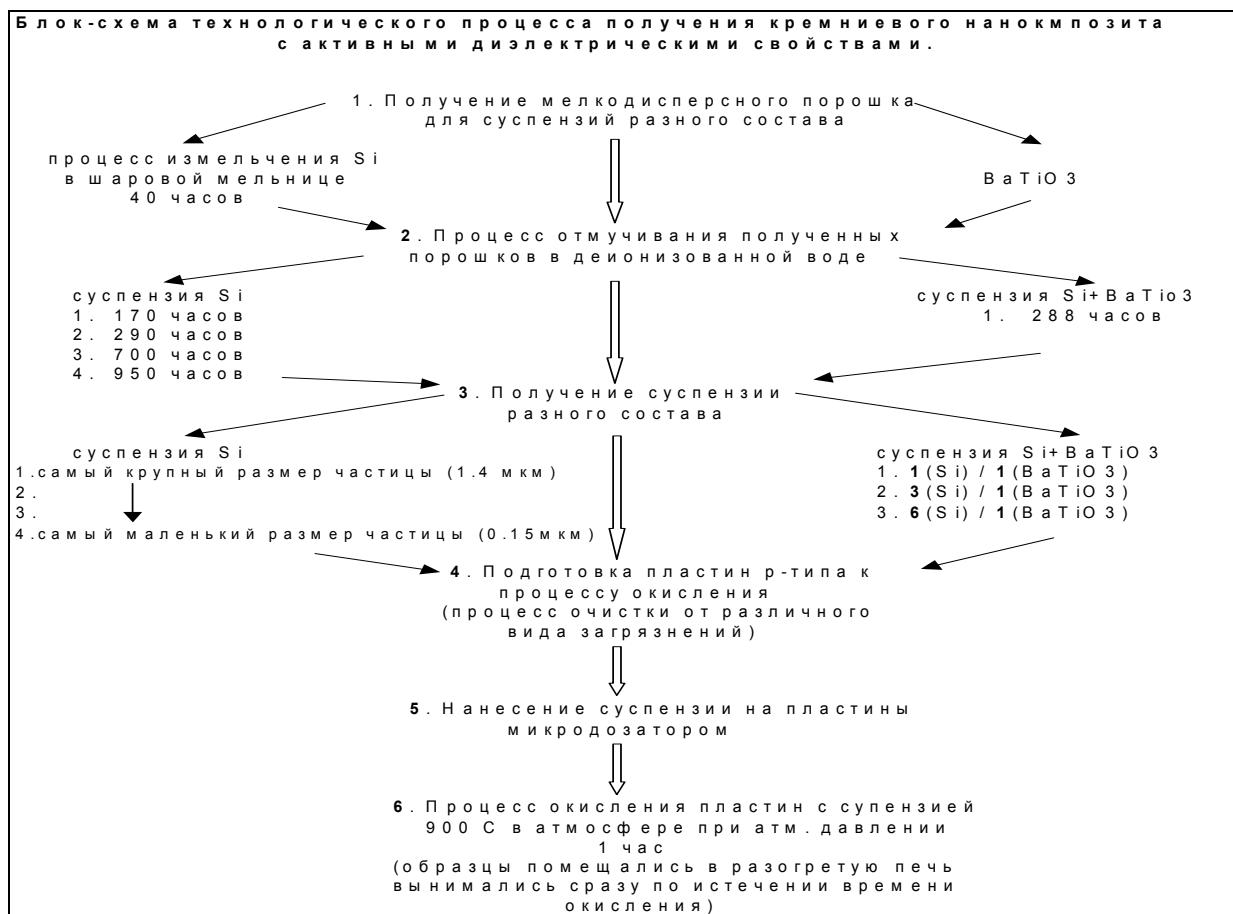


Рис.1. Технология получения образцов

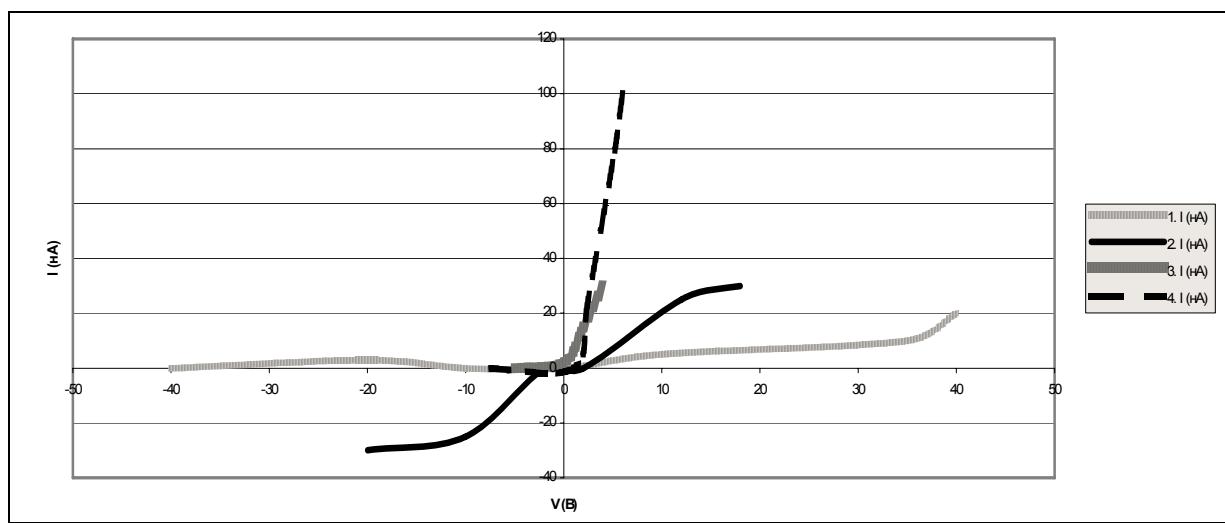


Рис. 2. Статические ВАХ (образцы № 1–4)

Из приведенных кривых можно сделать вывод о том, что возможно изменение механизмов процесса токопереноса в композиционной структуре при изменении структурных свойств композита. В процессе уменьшения размеров частиц кремния (проводящие включения в матрице  $\text{SiO}_2$ ) происходит качественное изменение механизма пе-

реноса носителей заряда с преобладающего туннельного транспорта (образец №1) на дисперсионный механизм токопереноса, ограничиваемого в той или иной степени захватом на ловушки, т.е. с уменьшением размера исходных частиц происходит увеличение числа ловушек в приповерхностной зоне границы раздела Si-SiO<sub>2</sub>.[5-7]

Далее рассмотрим динамические ВАХ.

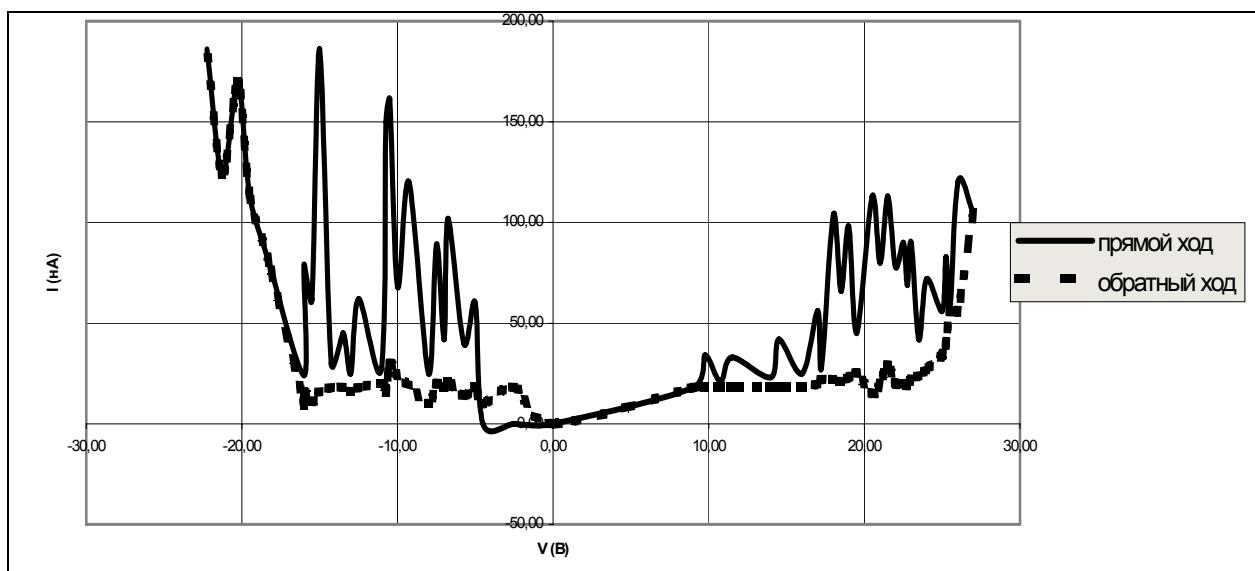


Рис. 3. Динамическая ВАХ (образец – микропорошок кремния)

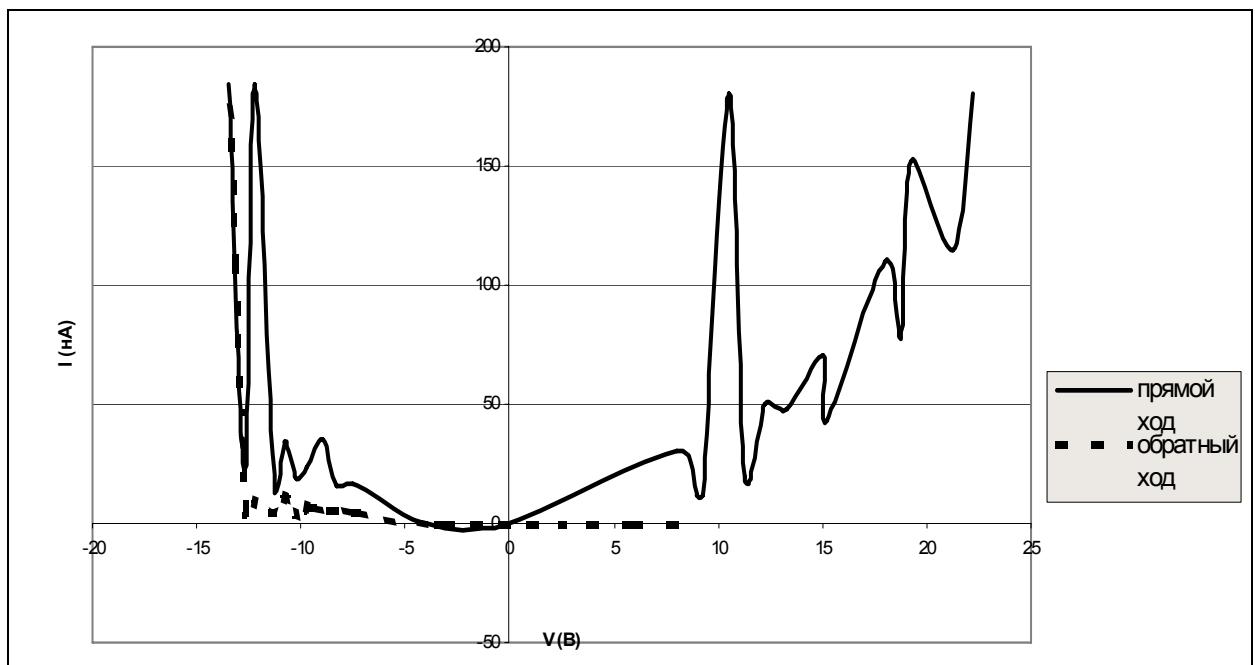


Рис. 4. Динамическая ВАХ (образец – микропорошок кремния + сегнетоэлектрик)

В соответствии со строением переходной области Si-SiO<sub>2</sub> в ней присутствуют трехкоординированные атомы кремния, имеющие одну ненасыщенную связь. В окисном слое, полученном при относительно низкой температуре 900 °C окисленном на атмосфере, значительная часть недоокисленных связей Si связывается фрагментами воды с образованием групп Si-OH, концентрация которых равна 10<sup>21</sup> см<sup>-3</sup>, что совпадает с литературными данными [8–10].

Сравнивая динамические ВАХ микропорошка кремния и микропорошка с сегнетофазой, можно увидеть, что на образцах с микропорошком кремния имеется порядка 7 пиков острой формы, а на образцах, где присутствует сегнетоэлектрик, – около 5 пиков совершенно другой формы. Высота пика пропорциональна концентрации каждого вида дефектов, а ширина пика пропорциональна функции энергетического распределения [11]. Следовательно, количество видов дефектов вместе с концентрацией уменьшается, но растет ширина энергетического распределения каждого вида дефектов, т.е. происходит трансформация дефектов из одного сорта дефектов в другие [12, 13].

Если рассматривать образцы с сегнетофазой, то самое маленькое число пиков имеет место там, где меньше всего процентное содержание сегнетоэлектрика. Число пиков возрастает вместе с концентрацией сегнетоэлектрика в суспензии. Это говорит о том, что титанат бария трансформирует ловушки приповерхностной области  $\text{SiO}_2$ , а с увеличением концентрации сегнетоэлектрика образуются новые дефекты (ловушки), образуемые уже самим титанатом бария [14, 15].

При термическом окислении микропорошка кремний–сегнетоэлектрик происходит частичная компенсация образующихся дефектов  $\text{SiO}_2$  и образование новых дефектов  $\text{BaTiO}_3$ , которые проявляются в наличии гистерезиса.

## Заключение

На основе существующей микропорошковой технологии удалось показать возможность создания композиционного материала с наличием пироэлектрических свойств.

Для оценки возможностей работы в качестве инфракрасного датчика оценены транспортные свойства материала [16].

Проведены исследования структурных свойств с помощью электронной микроскопии. Проведена оценка степени окисления микропорошка кремния при создании композиционного материала [17].

Была оптимизирована технология получения микропорошка кремния с различным размером частиц.

## Литература

1. Реньян В.Р. Технология полупроводникового кремния. М.: Металлургия, 1969. 335 с.
2. Мильвидский М.Г., Чалдышев В.В. Наноразмерные атомные кластеры в полупроводниках – новый подход к формированию свойств материалов. // Физика и техника полупроводников (ФТП). 1998. №5. С. 513.
3. Алферов Ж.И. История и будущее полупроводниковых гетероструктур. // ФТП. 1998. №1. С. 3.
4. Гусев А.И., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. М.: Физматлит, 2001, 221 с.
5. Суздалев И.П. Нанокластеры и нанокластерные системы. 2003. <http://www.rffi.ru/default.asp>
6. Кашкаров П.К. Необычные свойства пористого кремния. 2001. <http://www.pereplet.ru/obrazovanie/stsoros/1159.html>
7. Качурин Г.А., Яновская С.Г., Володин В.А., Кеслер В.Г., Лейер А.Ф. О формировании нанокристаллов кремния при отжиге слоев  $\text{SiO}_2$ , имплантированных ионами Si. // ФТП. 2002. №6. С. 685.
8. Лейер А.Ф., Сафонов Л.Н., Качурин Г.А. Моделирование формирования нанопрепципитатов в  $\text{SiO}_2$ , содержащем избыточный кремний. // ФТП. 1999. №4. С. 389.

9. Драгунов В.П., Неизвестный И.Г., Гридчин В.А. Основы наноэлектроники, Новосибирск, 2000.
10. Наноструктуры, ПерсТ. Вып. 24. 2003. <http://perst.issph.kiae.ru/Inform/tem/NANO/98-99/NANO.htm>
11. Зимон А.Д. Адгезия пыли и порошков. М.: Химия, 1976. 431 с.
12. Барабан А.П., Булавинов В.В., Коноров П.П. Электроника слоев  $\text{SiO}_2$  на кремнии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1988. 303 с.
13. Материалы седьмой зимней школы по физике полупроводников (27 февраля – 10 марта 1975 г.). ЛИЯФ, 1975. 566 с.
14. Тареев Б.М. Физика диэлектрических материалов. М.: Энергия, 1973. 328 с
15. Гороховатский Ю. А. Основы термодеполяризационного анализа. М.: Наука, 1981. 173 с.
16. Томашпольский Ю.А Сегнетоэлектрические пленки сложных окислов металлов. М.: Металлургия, 1978. 140 с.
17. Гориш А.В. Физика сегнетоэлектрической керамики. Москва, 1999. 110 с.

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НОВЫХ КРИПТОГРАФИЧЕСКИХ ПРОТОКОЛОВ

## А. А. Попов

В статье рассматривается родственное семейство протоколов аутентификации и цифровой подписи, базирующихся на основных элементах симметричной криптографии, которые выполнены иначе, чем предыдущие конструкции.

### Введение

Данное семейство разработала группа ученых, а именно: Росс Андерсон, Джон-Гиен Ли и Кэралампос Мэнифавас (компьютерная лаборатория Кембриджского университета, Англия), Франческо Бергадано и Бруно Криспо (отделение информатики, Туинский университет, Италия), Роджер Нидхем (отдел исследований Майкрософт, Кембридж, Англия).

Ранее технологии подписи бесконечных потоков содержали единовременную подпись для каждого блока сообщений; данная разработка показывает, что в ряде случаев в реальности достаточно проводить небольшое количество вычислений хэш функции. Изначально протокол Диффи Хеллмана позволял создавать конфиденциальный ключ из рабочего по двум принципам; здесь представлен аналогичный протокол целостности, который позволяет двум людям, не владеющим общим секретом, установить защищенный канал, в который не смогут впоследствии вторгнуться злоумышленники. В дополнение к возможности использовать эти разработки в реальных приложениях затрагиваются интересные вопросы об определенности цифровой подписи, а также взаимоотношении между целостностью и подлинностью.

### Существующие протоколы

Большинство существующих криптографических протоколов, предоставляющих подтверждение подлинности, как исходных, так и производных, основываются на алгоритмах цифровой подписи, таких как RSA и DSA. Как бы удобно это ни было, в некоторых приложениях это не необходимо: некоторые службы обеспечивались без подписей, например, система SWIFT для банковских транзакций, которая была установлена в середине 70-х как замена для более старых и менее защищенных трансфертных телеграфических систем. В SWIFT два взаимодействующих банка распределяли MAC ключи, которыми обменивались вручную; сообщения проходили от одного банка к другому через закрытую сеть со сложной, независимо администрируемой аппаратурой регистрации (последняя версия SWIFT имеет цифровые подписи, но с тех пор как они являются очевидным приложением к MAC, служба регистрации все еще нуждается в подтверждении подлинности). Как бы то ни было, третья группа регистрирующих устройств дорогостояща, и во многих приложениях требуется, чтобы администратор доступа имел значения для генерации и хранения свидетельств (данных), которые могли бы им понадобиться для опубликования их замечаний при возможных последующих конфликтах.

Ранние системы, не полагающиеся на третью группу регистрации, были разработаны TRW для NSA в 1970-х г.г. для аутентификации сообщений с сенсоров, расположенных на ракетных бункерах, для наблюдения за соглашением SALT 2 [1]. Они использовали связанное шифрование: сообщение сначала должно было быть зашифровано российским, а затем американским устройством. Ключи становились доступными другой стороне (и третьей группе наблюдателей, такой как Организация Объединенных Наций) после того, как сообщения регистрировались всеми заинтересованными сторо-

нами. Эта технология была опубликована в 1983 году в контексте соглашения по запрещению ядерного оружия; она была предпочтительнее RSA, так как ни одна из сверхдержав не доверила бы устройству, построенному другой [2].

Первый опубликованный подход для обеспечения подтверждения подлинности без использования асимметрического шифрования принадлежал Лампарту, который генерировал подписи открытием блокировок, которые создавались при помощи односторонней хэш-функции [3]. Основная идея здесь в том, что подписывающий выбирал два случайных числа (представляющие 0 и 1) для каждого бита сообщения и представлял их отображение под односторонней хэш-функцией. Для подписи сообщения он открывал исходные представления, соответствующие действительным 0 и 1. Несмотря на дополнения Меркла, Эвена, Голдрейха и Микали и Блейхенбахера и Маурера [4], эта технология до сих пор требует множества вычислений.

В этой статье показано, как построить цифровые подписи, которые не требуют большого количества вычислений хэш-функций. Это изменение произошло оттого, что подписи делаются интерактивными (согласованными); пользователи могут как взаимодействовать друг с другом, так и со службой отсечки времени. Во многих приложениях взаимодействие с противоположной или доверенной третьей стороной требуется в порядке подтверждения доступности средств, уникальности продаваемых инструментов или отсутствия ключа на листе отмены сертификата. В данном случае можно обойтись подписями, основанными на теории чисел.

## Новое семейство протоколов

Основная идея пришла к разработчикам 4 ноября 1996 в процессе обсуждения того, как в наши дни Гай Фокс для взрыва Парламента мог организовать гласность своих целей, но остался непойманным (Фокс замышлял взорвать короля Якова Первого и Парламент в 1605 году; это была попытка прекратить гонения на римских католиков. Фокс был пойман в результате ошибки: зашифрованное письмо от одного из заговорщиков было перехвачено и расшифровано).

Работу своего протокола они показывают на примере. Наивным подходом было бы позвонить в отдел новостей Таймс и сказать: «Я представляю свободную армию якобинцев, и мы собираемся провести завтра освободительную акцию. Как только мы ее выполним, я позвоню и скажу кодовое слово «Дарнлей» для установки наших требований». Это не особенно безопасный способ проведения дел. Сообщение будет передано полиции, которая может помнить распорядок работы Парламента и удвоить охрану. Поэтому будет более благоразумно послать хэшированное сообщение. При условии, что хэш-функция действительно односторонняя (техническая, псевдослучайная), она не даст утечки информации.

Понятно, что такие организации, как ИРА, используют разделенные кодовые слова в газетах и используют их, чтобы подтвердить свои преступления. Несмотря на это, такой протокол открыт для работников газеты (или других людей с доступом, таких как работники телефонной компании или полицейские с доступом к перехвату телефонных линий). Поэтому следующий шаг к совершенствованию протокола – это заменить кодовое слово его хэшированием.

Теперь протокол таков.

1. Выбрать случайное кодовое слово X.
2. Создать его хэш-значение  $Y = h(X)$ .
3. Составить сообщение  $M = \text{«Мы – свободная якобинская армия, и мы собираемся взорвать Парламент завтра. Кодовое слово, которым мы будем определять свою подлинность после, будет изначальное значение } Y\text{»}$ .
4. Вычислить  $Z = h(M)$  и анонимно опубликовать.

5. Взорвать Парламент.

6. Открыть сообщение.

Это может оказаться чуть более технологичной версией протоколов, уже используемых различными освободительными группами и преступниками. Все еще остается серьезная проблема того, что перед лицом способного, мотивированного оппонента пароль остается единовременным; если он один раз открыт и стал известен газетам и полиции, любой журналист или полицейский теоретически могут замаскироваться под лидера повстанцев. Конечно, если Гай Фокс попробует установить свои требования, послав в «Таймс» кодовое слово X с политическими требованиями P (вотум Католиков), полиция может перехватить сообщение и заменить P на требования P' (миллион гиней Фоксу!), которое дискредитирует Фокса и его организацию.

Новшество разработчиков – это ввести цепной механизм, который позволяет привязывать кодовые слова к сообщениям таким образом, что обеспечивается не только аутентификация, но и подтверждение подлинности. Это также позволяет обновлять секретное кодовое слово, так что система может использоваться произвольное число раз. Основная идея состоит в том, что во время каждого раунда протокола в строку сначала помещаются составляющие (кодовое слово, сообщение, [хэш следующего кодового слова]) и публикуется ее хэшированное значение. Этот блок привязывает сообщение к кодовому слову и его преемнику. Затем открывается значение строки, доказывая знание кодового слова, и этим аутентифицируем себя.

Предположим, что опубликовано  $Z_i$  сопровождаемое сообщением  $M_i$  содержащее  $h(X_i)$ , где секретное кодовое слово – текущее  $X_i$ . Требуется аутентифицировать сообщение  $M_{i+1}$ . Мы следуем следующему протоколу.

1. Выбираем случайное слово  $X_{i+1}$ .
2. Создаем его хэш  $h(X_{i+1})$ .
3. Вычисляем  $Z_{i+1} = h(M_{i+1}, h(X_{i+1}), X_i)$  и публикуем его.
4. Открываем  $M_{i+1}$ ,  $h(X_{i+1})$ , и  $X_i$ .

Первое кодовое слово нуждается в дополнительных механизмах настройки; в большинстве приложений это стандартная цифровая подпись или несвязанная аутентификация.

Хэш-цепи были введены Лампортом [3] и использовались в приложениях единовременного пароля, таких как система единовременного пароля S/ключ, а также в некоторых протоколах электронной оплаты [5]. Там, как и здесь, эффект состоял в создании секретной связи при низких вычислительных расходах.

В S/ключе у пользователя была серия единовременных паролей, каждый из которых был основой для предыдущего; цель была показать, что санкционированный пользователь – настоящий, и защитить от пассивных атак (но не от активных, таких как воровство сессионного ключа). Эта цепь событий сводилась к событию единичной, ручной аутентификации, в которой последний элемент хэш-цепи устанавливался как первый пароль системы.

В протоколе оплаты цель состояла в том, чтобы связать количество электронных денег с единичной цифровой подписью, которая аутентифицирует их все, и это давало возможность серии небольших платежей, сделанных покупателем одному продавцу (такому как телефонная компания) при расходе одной цифровой подписи или операции аутентификации онлайн.

В протоколе Гая Фокса задачей является связать единичный акт аутентификации с потоком будущих заявлений в большей степени, чем с потоком будущих событий. Функционально разница состоит в том, что пока размер всех цифровых денег известен в момент их подписания, последующих заявлений, которые мы хотим аутентифицировать, может не быть. Поэтому будет недостаточно просто использовать хэш-цепь (как в S/ключе) как установку единовременного пароля для аутентификации политических

заявлений. Как упомянуто выше, кто-либо, кто перехватывает линию в момент передачи заявления и пароля в отдел новостей, может заменить заявление; работники в отделе новостей также могут по желанию заменить сообщение.

Другими словами, у шага передачи блокированного сообщения существует основное значение получения подтверждения подлинности, что приносит протоколу Гая Фокса такой же эффект, как и у цифровой подписи. Если бы якобинцы могли использовать асимметричную криптографию, тогда их первое сообщение читалось бы так: «Мы собираемся взорвать Парламент 5 ноября. Последующие требования будут с цифровой подписью и опубликованы с открытым ключом подтверждения подлинности  $W$ ». Оно могло быть зашифровано и опубликовано с ключом, который станет известен после события.

В итоге, в принятой модели, цифровая подпись устанавливает секретную связь между чем-то подписанным в определенное время и инстанцией аутентификации, которая может включать показ паспорта сертифицированному органу. Есть ли отличия у протокола Гая Фокса?

### Отличие от цифровой подписи

С этой точки зрения могут быть споры, что, даже если протокол Гая Фокса дает тот же эффект, что и цифровая подпись, он – не совсем подпись. Как бы то ни было, данный протокол удовлетворяет большинству описаний цифровой подписи, предлагаемых в литературе по данным.

Диффи и Хеллман устанавливают идею цифровой подписи в своей плодотворной работе «Новые направления»: «Должно быть просто кому-либо распознать подпись как аутентифицирующую, но невозможно кому-либо, кроме законного подписывающего, произвести ее» [6]. В момент написания данной работы единственным известным путем достичь этого было использование одноразовой подписи Лампорта. Протокол Гая Фокса усовершенствует Лампорта и, таким образом, естественно, удовлетворяет данному описанию; он также удовлетворяет более позднему описанию Диффи как «путь демонстрации другим людям, что оно (сообщение) отправлено определенным лицом» [7].

Фиат и Шамир усовершенствовали и дополнили описание, даваемое Диффи и Хеллманом. Аутентификация – это когда  $A$  может доказать  $B$ , что он  $A$ , но никто другой не может доказать  $B$ , что он  $A$ ; идентификация – когда  $A$  может доказать  $B$ , что он  $A$ , но  $B$  не может доказать кому-либо еще, что он  $A$ ; и подпись – когда  $A$  может доказать  $B$ , что он  $A$ , но  $B$  не может даже себе доказать, что он  $A$  [8]. Гай Фокс также удовлетворяет этому описанию.

Голдвассер, Микали и Ривест дают более запутанное описание, которое детально ссылается на множество алгоритмов и их свойства: алгоритм генерации ключа, алгоритм подписи и алгоритм верификации. Алгоритм подписи создает подпись, внедряя в сообщение, ключ и, возможно, другую информацию (например, случайный ввод); как бы то ни было, в их описании он производит только единичный результат [4].

Таким образом, эта модель исключает протокол Гая Фокса. Но оно также исключает обширный класс узаконенных подписей, которые хорошо известны и использовались в свое время, также как большинство нацеленных конструкций подписи, которые требуют взаимодействия, такие как неоспоримые подписи, характеризующие подтверждающие подписи и забытые подписи.

Наор и Янг дополняют подход Голдвассера, Микали и Ривеста, уменьшая сложность теоретических требований конструкции; в итоге это было сведено Ромпелем к существованию односторонней функции (которая была минимальной) [5]. Как бы

то ни было, как и у Голдвассера, Микали и Ривеста, их описание также не подходило к подписям, использующим взаимодействие.

Питцман дала наиболее полно изученные схемы различных подписей в своей диссертации [8]. Она пришла к заключению, что основное описание подписи – это процесс с некоторым числом точек доступа, типичных для подписывающего, получателя и контролера. Время – это необходимый компонент, даже логическое время (в понимании «глобальное понятие пронумерованных циклов») является достаточным. Специальные точки доступа могут быть добавлены для вероятных владельцев, таких как сертификационные и ревокационные уполномоченные. Данное описание полностью вмещает протокол Гая Фокса.

Так как было заявлено, что протокол Гая Фокса – не совсем подпись, то возражающий должен показать, как быть со многими другими видами подписи, которые требуют взаимодействия, также как важно следующим – структурам сертификационных и отменяющих служб, законным договорам и так далее – использование цифровой подписи. В большинстве приложений размер подписей, в конечном счете, зависит от договоренности (таких как закон о цифровой подписи или контракт между членами системы EDI), и утверждение четких договоренностей по цифровым подписям включает ссылку на онлайн или, по крайней мере, близкую к реальному времени сертифицированный ревокационный список.

## Двунаправленные потоки

Хэш-основанные подписи были забракованы как «тратящие время, дорогостоящие и неэкономные». Гай Фокс гораздо меньше предыдущих схем; и есть приложения, для которых он может быть практичен.

Рассмотрим большинство убедительных предложений для практических приложений подписей, основанных на хэш. Это метод Геннаро и Рошатки для подписания цифровых потоков. При подписании потока, который не полностью известен подписывающему (например, телепрограмма), они разделяют поток на блоки; каждый блок содержит один одноразовый открытый ключ на основе схемы Лампорта и подписан одноразовым закрытым ключом, чей открытый ключ отослан в предыдущий блок. Первый блок подписан оговоренным механизмом, таким как RSA. Таким образом, единичная оговоренная подпись может воздействовать на весь поток информации немедленно. Предоставляемая аутентификация быстра, асимметрическая криптография не требуется после того, как сессия установлена; но это объемно, так как оба – одноразовый открытый ключ и одноразовая подпись – должны быть добавлены к каждому блоку.

Механизм Гая Фокса может быть приспособлен к данному приложению и может значительно снизить количество требуемых вычислений; он может довольно неплохо справиться с двунаправленными потоками, такими как видеоконференции, он также хорошо работает в приложениях, где поток посыпается приемнику, который отсылает просто серии подтверждений.

Здесь целью защиты является следующее: если хоть один бит в двух потоках был изменен, обе взаимодействующие стороны обнаружат проблему; и механизмы аутентификации также быстры, как и в схеме Геннаро и Рошатки без приращения к сообщению (фактически Гай Фокс быстрее). В итоге он должен давать подтверждение подлинности, также как простая аутентификация; третья сторона, наблюдающая за подменой потока, может проверить источник и подлинность информации, как в противоположном симметричном MACe, где использовались распределенные секреты, которые делали возможным взаимные встречные обвинения.

В этом протоколе А и В обмениваются потоками сообщений, состоящими из упорядоченных блоков, которые мы назовем  $A_0, A_1, A_2, \dots$  и  $B_0, B_1, B_2, \dots$  соответственно;

каждый блок будет сопровождаться описывающей аутентификационной информацией.  $B_i$  посыпается после  $A_i$ , но перед  $A_{i+1}$ .

В дополнение, А выберет серию паролей  $X_0, X_1, X_2, \dots$ ; А будет помещать  $X_i$  в сообщение  $A_{i-1}$  и открывать в сообщении  $A_{i+1}$ . Этот блок называется  $a_i$  и имеет вид

$$a_i = h(A_{i+1}, h(X_{i+1}), X_i)$$

Подобным образом блок В принимает вид  $b_i = h(B_{i+1}, h(Y_{i+1}), Y_i)$ . Следует заметить, что А требуется буфер с размером, соответствующим двум блокам; для отправки сообщения  $A_i$  А должен знать  $A_{i+1}$  для порядка вычисления размера хэша  $a_i$ . Здесь это не является проблемой, например, каждый блок является видеокадром.

Первые шаги протокола, которые используют согласованные подписи для установки процесса, начинаются следующим образом:

$A \rightarrow B: A_0, a_0, h(X_0)$ , подпись<sub>A</sub>( $A_0, h(X_0)$ )

$B \rightarrow A: B_0, b_0, h(Y_0)$ , подпись<sub>B</sub>( $B_0, h(X_0)$ )

$A \rightarrow B: h(b_0, X_0)$

$B \rightarrow A: h(a_0, Y_0)$

Аутентификация каждого упорядоченного блока теперь имеет следующий вид:

$A \rightarrow B: A_1, a_1, h(X_1), X_0$

$B \rightarrow A: B_1, b_1, h(Y_1), Y_0$

$A \rightarrow B: h(b_1, X_1)$

$B \rightarrow A: h(a_1, Y_1)$

Так, на этом шаге, А установил пароль  $X_2$  (когда  $a_1 = h(A_2, h(X_2), X_1)$  и открыл пароль  $X_0$ ; это открытие аутентифицирует  $A_1$ , пока установка также обновляет пароли.

Предположительно правомерное возвращение на шаг  $n$ , и злоумышленник, который пытается выдать себя А как В, видит перехваченную строку  $B_n, b_n, h(Y_n), Y_{n-1}$ . Он не может заменить  $B_n$ , так как  $b_{n-1}$  содержит на него установку; он не может изменить  $b_n$ , так как он содержит вложенный  $Y_n$ , который он не знает, но который установлен в  $b_{n-1}$ ;  $h(Y_1)$  подобным образом был установлен в  $b_{n-1}$ ; и если он пошлет что-либо сверх правильного размера  $Y_{n-1}$  тогда это не будет соответствовать  $b_n$  и  $b_{n-1}$ . Подобным же образом он не может добавить что-либо в следующее сообщение сверх правильного размера  $h(a_n, Y_n)$ , так как, пока он не знает размер  $Y_n$ , он не может его изменить, так как он был вложен в предыдущий шаг  $n_{n-1}$ .

В итоге мы добились протокола для аутентификации единичного цифрового потока: А посыпает поток В, а В просто посыпает подтверждение приема с серийным номером в качестве текста  $B_n$ .

Здесь есть одна тонкость. Если все пароли в итоге станут известны, то по желанию можно урезать ложное содержание и вставить замену в запись. В основном протоколе, таким образом, мы получили что-то слабее подписи, но сильнее симметричной аутентификации. Сам по себе это интересный факт; очевидное направление приложения – это засвидетельствованная связь, где (например) видеоконференция также наблюдается третьей стороной, которую можно призвать, чтобы засвидетельствовать позже некоторые аспекты. Другие коммуникационные системы, где третья сторона протоколирует, такие как система SWIFT, упомянутая выше.

Однако наша схема может быть преобразована в довольно простую с оффайн подтверждением подлинности. Хитрость – в условии, что каждый участник договора сохраняет в секрете свой последний пароль и открывает его судье в случае возникновения споров. Альтернатива – каждый участник имеет нотариальное заверение хэша своего последнего пароля с копией сессии.

Данный протокол позволяет безопасно связывать несколько событий, и разработчики задаются вопросом, есть ли у него какое-либо интересное применение для идентификации участников договора в компьютерных сетях.

Сегодня множество людей строят взаимоотношения и даже научное сотрудничество по сети с людьми, которых они лично встретят позже.

Изложенный выше протокол для двунаправленной аутентификации показывает, как мы можем соединить хэш-основанную аутентификацию для двух разных людей в одно время. Нововведением здесь является то, что два участника, не владеющие одним общим секретом, могут защитить серию обмена информацией между ними. Как только этот целостный канал установиться, он может обеспечить безопасность как содержания, так и последовательность всех будущих сообщений.

Этот канал делает для целостности то, что протокол Диффи Хеллмана делает для безопасности. Это может выглядеть противоречиво и, конечно, противоречит общему мнению, что «атака человека посередине может разрушить любой протокол, не включающий секрет» [2]. Это неизбежно случится, если человек посередине, атакуя целостный канал, будет внедрен с самого начала; он не может присоединиться позже, или вид транзакции двух участников изменится нетривиальным образом.

На системном уровне это происходит потому, что мы устанавливаем канал с целостностью, но не аутентификацией, в смысле того, что мы не знаем, к кому обращаемся. Так, А, который хочет говорить с В, на деле может говорить с С. Как бы то ни было, С должен активно вмешаться в их обсуждения незамедлительно, если он хочет остаться незамеченным; он не сможет войти или выйти из их обмена по желанию.

Существуют приложения, где согласованная аутентификация может быть невозможна. Например, связь между диссидентами в стране-угнетателе заставляет документировать ключи подписи. В таких условиях доверие можно установить медленно после серии сообщений и того, как пользователи смогут как следует убедиться, что канал, которому они начали доверять, не перехвачен органом власти.

Любопытным свойством множества групп Гая Фокса является то, что когда один участник сводит двух других, с кем он установил сессию, он больше не может убедить ни одного из них, что другой на самом деле существует. А, представленный В посредством С, может быть представлен другой персоне участнику за С. Это является основным признаком электронных коммуникаций; это просто получается, когда мы начинаем обсуждать протоколы для установления доверия, которые не полагаются на установочное событие в реальном мире.

Довольно широко известна проблема, когда злоумышленник может получить статус внедрения, используя хорошо известные слабые места операционной системы, и затем подменить подтверждения и журнальную информацию, чтобы убрать свидетельства вмешательства. Для того чтобы предотвратить это, системы Unix требуют, чтобы операции над данными подтверждения и журнала, кроме чтения и добавления записи, хранились вне системной консоли. Другие этого не делают, и им могут потребоваться альтернативные механизмы подтверждения вмешательства.

Первой идеей может быть просто отмечать контрольный журнал в определенные интервалы, но этого недостаточно, так как внедренный злоумышленник сможет получить закрытый ключ подписи и подделать прошлые записи подтверждения. В дополнение, интервалы должны быть малы (порядка секунды или даже меньше), и вычисления подписей RSA и DSA при данной частоте могут повлечь заметную перегрузку системы.

В данном приложении протокол Гая Фокса оказывается весьма уместным в силу низкой вычислительной нагрузки (два вычисления хэш-функции на подпись) и того, что все секреты временные; это секундное кодовое слово не используется в подписи, изменившейся секунду назад.

Рассмотренная здесь архитектура состоит в том, что каждый сервер или другая чувствительная машина на LAN будет аутентифицировать свой журнал и подтверждать данные один раз в секунду (или даже чаще) с услугой локальной отсечки времени, ко-

торая будет запущена на машине, защищенной от уязвимости, такой как сендмэйл. Протоколы для этого разрабатываются.

## Заключение

Разработчики протокола показали, что можно осуществить службу подтверждения подлинности без использования механизмов открытого ключа, сопротивления взлому или регистрацией третьей стороной. Протокол содержит новый защитный базовый элемент, который в своей простоте образует действия, очень схожие с цифровой подписью и может быть получен при незначительных затратах на вычисления, при предоставленной службе отсечки времени. Также показан базовый двунаправленный элемент, который можно использовать для аутентификации цифровых потоков, со значительно меньшими затратами, чем у лучшего предыдущего протокола. Это приводит к «целостному эквиваленту» Диффи Хеллмана: два пользователя при соответствующих допущениях могут установить канал, чей трафик защищен от модификации, без обладания каждым из них секретом при старте протокола.

## Литература

1. The History of Subliminal Channels, GJ Simmons, in Proceedings of the First Inational Workshop on Information Hiding (Springer LNCS v 1174) pp. 237–256.
2. Verifcation of Treaty Compliance | Revisited, GJ Simmons, in Proceedings of the IEEE Symposium on Security and Privacy (IEEE, 1983) pp. 61–66.
3. Constructing digital signatures from a one-way function, L Lamport, SRI TR SL 98 (1979).
4. A Digital Signature Based on a Conventional Encryption Function. RC Merkle, in Advances in Cryptology | Crypto 87 (Springer LNCS v 293) pp. 369–378.
5. A Certified Digital Signature, RC Merkle, in Advances in Cryptology | Crypto 9 (Springer LNCS v 435) pp. 218–238.
6. On-line / of-line digital signatures, S Even, O Goldreich, S Micali, in Advances in Cryptology | Crypto 89 (Springer LNCS v 435) pp. 263–275.
7. Directed Acyclic Graphs, One-way Functions and Digital Signatures, D Bleichenbacher, UM Maurer, Advances in Cryptology | Crypto 94 (Springer LNCS v 839) pp. 75–82.
8. The S/KEY One-Time Password System", N Haller, in Proceedings of the ISOC ymposium on Network and Distributed System Security (February 1994, San iego, CA) pp. 151–157; see also RFCs 1704, 1760 and 1938.

# ПРОЦЕССИНГ МНОГОМЕРНЫХ КУБОВ В СИСТЕМАХ OLAP РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

## В.А. Климанов

Целью данной работы является исследование процессинга многомерных кубов в системах OLAP реального времени. В данной статье рассматриваются основные критические характеристики таких систем, оказывающие непосредственное влияние на время ответа на пользовательские запросы.

### Введение

Идея Real-Time OLAP заключается в том, что большинство данных, запрашиваемых пользователем, являются агрегированными, поэтому нет необходимости хранить детальные данные как в хранилище данных (далее ХД), так и в многомерной базе данных (далее МБД), как при использовании MOLAP архитектуры.

Классический OLAP предполагает отражение изменений, произошедших в транзакционных источниках, не непрерывно, а в определенные моменты времени. Частота синхронизации куба может колебаться в самых широких пределах в зависимости от природы приложения, скорости обновления и объемов данных [1].

В ситуациях крайне динамично развивающихся бизнес-процессов, когда значительная часть данных в хранилище устаревает очень быстро, а аналитик должен работать не с исторической, а с постоянно обновляемой информацией (например, биржевые торги), такой подход неприемлем. Требуется сразу по мере поступления даже одиночной транзакции отражать ее в кубе и пересчитывать с ее учетом агрегаты. Приложения подобного рода относятся к области OLAP реального времени (real-time OLAP).

В данной работе производится исследование функционирования работы приложений, построенных на основе OLAP реального времени, рассматриваются особенности процессинга многомерных кубов, производится оценка минимального времени между запросами в таких системах и максимального числа таких запросов.

### Процессинг многомерных кубов

Под процессингом куба имеется в виду расчет агрегатов и наполнение структуры куба агрегатами и детальными данными [3]. В случае ROLAP агрегаты будут храниться в таблицах или представлениях реляционного источника. В случае HOLAP или MOLAP агрегаты помещаются в специальную многомерную структуру. Перенос в многомерную структуру детальных данных происходит только в том случае, если выбран формат хранения MOLAP, что несколько увеличивает время процессинга, но впоследствии позволяет повысить скорость обработки аналитических запросов. Процессинг добавляет в куб изменения, произошедшие в транзакционных источниках. Процессинг выполняется в определенные моменты времени по команде администратора либо по расписанию. В Microsoft SQL Server 2000 задача процессинга входит в список стандартных заданий DTS, кроме того, ее можно выполнить программным путем при помощи DSO.

В зависимости от ситуации для куба можно выбирать один из трех вариантов процессинга. Первый вариант – дифференциальный процессинг (incremental update) – соответствует ситуации штатной работы, когда куб пополняется изменениями, наработанными транзакционным приложением, скажем, за последний день, и на основе этих изменений досчитываются кумулятивные агрегаты. Это наиболее быстрый вариант процессинга. В этом случае Analysis Services создает временный раздел по условию фильтра, установленного администратором (например, Время = Текущий день), обрабатывает его, а затем добавляет к основному разделу куба (если куб состоит из нескольких разделов, то раздел-назначение необходимо оговорить особо). Второй вариант – обновле-

ние куба (refresh data) – применяется, когда в транзакционных источниках изменились данные, уже перемещенные в куб (например, если задним числом была сделана проводка, филиалы прислали корректировки и т.д.) В этом случае существующий куб очищается, данные в него перезагружаются и агрегаты пересчитываются заново. Наконец, третий вариант – полный процессинг (full processing) – представляет собой предыдущий вариант плюс пересчет всей структуры агрегатов (а не только их значений). Он используется при создании нового куба, а также в случае изменения его структуры, например, при удалении или добавлении новых измерений. Это наиболее длительный вариант процессинга. Использование нескольких разделов позволяет гибко настроить процедуру процессинга. Одной из типичных ситуаций, например, может быть разбиение куба на разделы, соответствующие периодам времени  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ , где  $T_1$  – относительно небольшой актуальный период, за который, как правило, происходят изменения (этот раздел будет обрабатываться во время каждого процессинга);  $T_2$  – изменения допускаются, но происходят относительно редко, он будет обрабатываться только в случае этих изменений;  $T_3$  – архивные данные. Скажем,  $T_1$  – текущий год,  $T_2$  – прошлый,  $T_3$  – вся остальная история предприятия. Процессинг  $T_2$ , скорее всего, потребуется в начальный период текущего года, когда раздел  $T_1$  еще не очень велик, и длительность его процессинга незначительна. Следует иметь в виду, что при произвольном изменении условия фильтра раздела может потребоваться повторная обработка всего куба.

Процессинг измерений бывает двух видов: Incremental Update и Rebuild Dimension Structure. В первом случае источник измерения прочитывается заново, определяются (по Member Key) новые члены, которые добавляются в измерение.

Второй способ, как следует из названия, заново перестраивает структуру измерения и применяется в случае добавления/удаления уровней и других изменений в иерархии, например, при переподчинении членов между родителями. Для появившихся в SQL Server 2000 медленно меняющихся измерений перечень ситуаций, требующих перестройки структуры, значительно ослаблен. Перестройка структуры измерения влечет за собой полный процессинг всех кубов, что не позволяет работать с данными кубами в течение этого времени. Сказанное до сих пор относилось к так называемым общим измерениям, которые существуют как независимые от куба сущности и могут входить в несколько кубов в пределах одной базы данных. Частные измерения – это измерения, которые незаметны вне того куба, где они были определены. Для частных измерений Incremental Update соответствует Refresh Data куба, а Rebuild Structure – Full Processing.

Во время процессинга запросы к транзакционным данным генерируются автоматически с использованием стандартного синтаксиса SQL. Длительность процессинга, таким образом, складывается из двух этапов: времени выполнения запроса на чтение операционным источником и обработки полученных результатов собственно в Analysis Services (1).

$$T_{\text{пр}} = T_{\text{чт}} + T_{\text{об}}. \quad (1)$$

Для исследования эффективности первого этапа можно оценить время выполнения запроса, который формируют Analysis Services, встроенными средствами СУБД, используемой в транзакционном приложении. Например, в случае SQL Server для этого можно воспользоваться утилитой SQL Profiler. Отредактировать текст формируемого запроса невозможно. Как уже отмечалось, в качестве реляционных ресурсов для Analysis Services допускается широкий спектр OLE DB- и ODBC-источников, поэтому отсутствие возможности влиять на запрос является своего рода платой за универсальность. Можно порекомендовать, например, создать в операционном источнике представление, в определение которого заложить все необходимые предикаты, параметры оптимизатора и проч. Дополнительная настройка может быть проведена с помощью корректировки свойств OLE DB-соединения в определении источника данных многомерной БД. Оптимизация структуры куба (Cube Editor -> Tools -> Optimize Structure)

позволяет выявить и устраниить лишние связи между таблицами. Например, Analysis Services идентифицирует члены измерения внутри уровня по Member Key Column. Как правило, в этом качестве выступает первичный ключ таблицы измерения. Если по этому же ключу таблица измерения связана отношением «один ко многим» с таблицей фактов, система предложит использовать внешний ключ таблицы фактов, что позволит сэкономить на довольно дорогом операторе join. В целом для типа и размера Member Key справедливы те же рекомендации, что и для индексного ключа. Чем короче ключ, тем меньше места требуется на его хранение и тем быстрее выполняется операция сравнения. Целочисленные ключи практически всегда выигрывают по сравнению со строковыми. На втором этапе в SQL Server 7.0 для каждого раздела выделялись два параллельных потока: Reader и Processing/Aggregation. Первый добавлял результаты запроса в буфер опережающего чтения, второй вычислял агрегаты и переносил (MOLAP) детальные данные в многомерную структуру, периодически (в целях экономии памяти) сбрасывая результаты на диск во временный каталог OLAP сегментами по 64 Кбайт. Таким образом, использование более чем двухпроцессорных конфигураций в предыдущей версии не давало выигрыша в скорости процессинга раздела.

В SQL Server 2000 это ограничение снято. Однако, как показывает практика, с точки зрения производительности эффективнее разбивать куб на несколько разделов, каждый из которых обрабатывается своей парой потоков, чем выделять суммарно эквивалентное количество потоков для обработки куба того же размера, состоящего из единственного раздела.

### **Особенности функционирования систем OLAP реального времени**

Появившаяся в SQL Server 2000 поддержка ROLAP-измерений и индексированных (материализованных) представлений (indexed views) позволяет реализовать систему OLAP реального времени ценой меньших усилий с точки зрения администрирования. Если форматом хранения раздела куба является ROLAP, Analysis Services по умолчанию пытаются создать индексированное представление для хранения агрегатов данного раздела. В отличие от классических, индексированные представления содержат не только определение запроса, но и его результаты, которые обновляются всякий раз, когда происходят изменения в исходных данных [3]. С этой точки зрения индексированные представления ведут себя подобно обычным индексам, что позволяет поддерживать содержащиеся в них агрегаты в постоянно актуальном состоянии. Специально выделенный поток (listener thread) служит средством коммуникации, с помощью которого аналитический сервер получает от реляционного источника данные об изменениях, произошедших в таблицах, соответствующих ROLAP-разделам и ROLAP-измерениям, и автоматически обрабатывает их в фоновом режиме, очищая серверный кэш. Включение оповещений достигается установкой свойства Enable Real-Time Update при создании ROLAP-раздела или ROLAP-измерения.

Использование OLAP реального времени налагает определенные ограничения, так как в качестве реляционного источника при этом должен использоваться только SQL Server 2000 (иначе не будет работать механизм оповещений), причем, очевидно, Enterprise Edition (должны присутствовать индексированные представления). Аналитический сервер также должен быть построен на основе SQL Server 2000 Enterprise Edition, так как функциональность ROLAP-измерений включена только в эту версию, как отмечалось выше. ROLAP-разделы, построенные на основе индексированных представлений, не могут включать меры с агрегатными функциями min(), max(), должны основываться на таблицах (не на представлениях), источником меры должно быть поле типа not null и т.д.

Платой за реальное время являются потери в скорости выполнения OLAP-запросов. SQL Server 2000 позволяет их снизить, допуская непустое множество агрегатов за счет поддержки индексированных представлений. Кроме того, гибкая архитектура куба предполагает дальнейшую оптимизацию. Например, можно разбить куб на два раздела: меньший, ROLAP, соответствующий ситуации реального времени, основанный на данных, скажем, текущего месяца, и MOLAP-раздел, содержащий всю оставшуюся историческую информацию.

Несколько модифицированный вариант этой идеи состоит в том, чтобы создавать не разделы, а отдельные кубы для текущих и архивных данных и строить объединяющий их виртуальный куб, с которым и будут работать конечные пользователи.

Для наглядности изобразим структуру типичной OLAP системы реального времени (рис. 1).

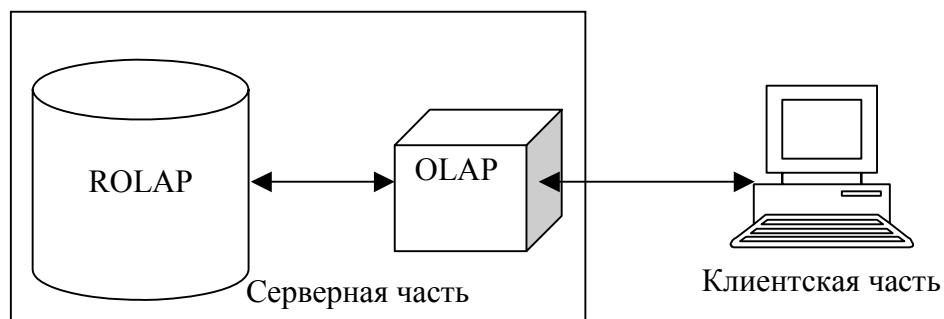


Рис. 1. Структура Real-Time OLAP

Упрощенно процесс функционирования системы OLAP реального времени выглядит так. В реляционное хранилище приходит транзакция, обновляющая (дополняющая) значения какого-либо измерения. По этому событию вызывается пересчет агрегированных значений куба. Естественно, это занимает определенное время – назовем его временем расчета агрегатов  $t$ . После выполнения сервером описанных операций пользователь получает в клиентском приложении обновленные агрегаты с учетом каждой поступившей транзакции обновления измерений. Эти транзакции поступают на сервер через некоторый промежуток времени – назовем его интервалом обновляющих транзакций  $I$ .

### Оценка ограничений на функционирование Real-Time OLAP

Для проведения экспериментов, связанных с OLAP реального времени, использовался Microsoft SQL Server 2000 SP2, установленный на рабочей станции с одним процессором 600 МГц и 256 Мб памяти, под управлением Windows 2000 Professional. Для выполнения экспериментов использовалось небольшое приложение, написанное на Visual Basic, инициирующее обновляющие транзакции на сервере через определенные промежутки времени. При этом производились замеры времени расчета агрегатов для каждой транзакции. В качестве клиента использовалась рабочая станция под управление Windows 2000 Professional с процессором тактовой частоты 1,8 ГГц и 256 Мб оперативной памяти.

Экспериментальный куб данных содержал три измерения. Каждое измерение содержало 1000 значений, объединенных в сбалансированную иерархию. Таким образом, куб, используемый для определения основных характеристик Real-Time OLAP системы имел структуру, представленной в табл. 1.

Уровень	Dim1	Dim2	Dim3
1	1	1	1
2	10	10	10
3	100	100	100

Таблица 1. Структура МБД

Единичная обновляющая транзакция добавляла 10 значений на нижний уровень иерархии, в результате чего инициировался пересчет агрегатов на верхних уровнях. После проведения каждой серии экспериментов исходный куб восстанавливался исходным числом значений измерений.

В общем случае поток обновляющих транзакций может быть распределен по случайному закону. В данной работе мы рассмотрим случай, когда интервал обновляющих транзакций является детерминированным, т.е. временные значения этого интервала постоянны:  $I = I_1 = I_2 = \dots = I_N = \text{const}$ .

Для достижения максимальной производительности, доступной для данной аппаратной конфигурации сервера, важно, чтобы соблюдалось следующее условие:

$$T < I, \quad (2)$$

где  $T$  – время расчета агрегатов после поступления единичной обновляющей транзакции. Однако данный случай в работе сервера встречается нечасто и может быть рассмотрен лишь как идеальный вариант. На практике же бывает так, что транзакции поступают с интервалом меньшим, чем время обработки одной транзакции. В этом случае сервер задействует встроенные средства параллельной обработки, используя общие ресурсы процессора и памяти, в результате чего время выполнения одной транзакции увеличивается по сравнению со временем, как если бы выполнялась только одна эта транзакция.

Очевидно, что время, затрачиваемое на выполнение расчета агрегатов для каждой транзакции, зависит в общем случае от интервала следования обновляющих транзакций и их числа:

$$t_i = t(I_i, N) = t(I, N). \quad (3)$$

Поэтому для определения минимального интервала следования обновляющих транзакций необходимо варьировать обе эти величины. Для наглядности построим графики зависимостей полученных результатов. Зависимость времени расчета агрегатов от числа обновляющих транзакций представлена на рис. 2.

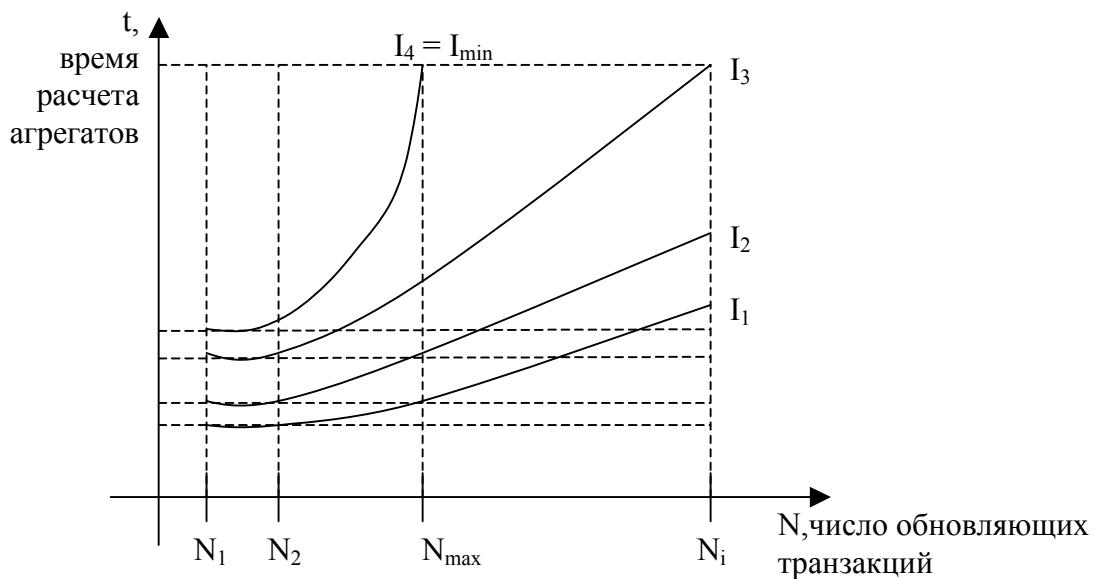


Рис. 2. Время расчета агрегатов в зависимости от числа обновляющих транзакций

На рис. 2 интервалы следования обновляющих транзакций связаны следующей зависимостью:  $I_1 < I_2 < I_3 < I_4$ .

Экспериментально было показано, что при достижении некоторого значения числа обновляющих транзакций  $N_{\max}$  время расчета агрегатов становилось бесконечно большим. Таким образом, было показано, что для Real-Time OLAP систем существует некоторое максимальное значение числа обновляющих транзакций, выше которого сервер уже не может их обработать:

$$t \rightarrow \infty \Big|_{N=N_{\max}}. \quad (4)$$

При достижении этого значения время расчета агрегатов резко увеличивается, а время ожидания ответа на запрос клиентского приложения также стремится к бесконечности, что следует из зависимости (4).

Работа OLAP системы реального времени ограничивается также еще одной величиной – минимальным интервалом следования обновляющих транзакций  $I_{\min}$ . На рис. 3 представлена зависимость времени расчета агрегатов от интервала между обновляющими транзакциями.

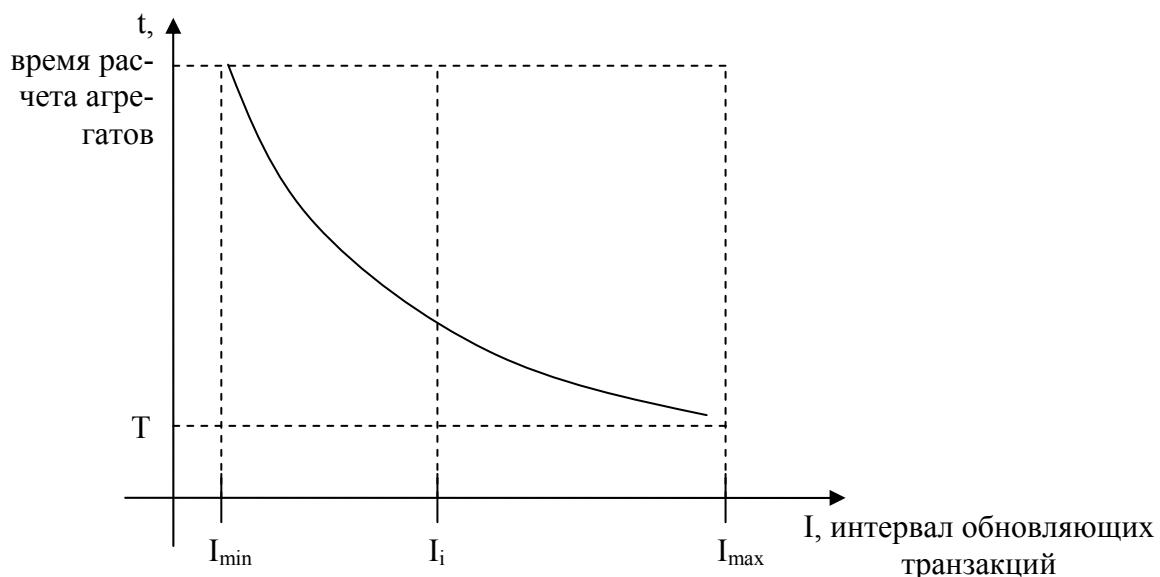


Рис. 3. Зависимость времени расчета агрегатов от интервала обновляющих транзакций

Как видно из рис. 3, время расчета агрегатов становится бесконечно большим при достижении некоторого интервала обновляющих транзакций  $I_{\min}$ :

$$t \rightarrow \infty \Big|_{I=I_{\min}} \quad (5)$$

При достижении этого значения время расчета агрегатов резко увеличивается, и время ожидания ответа клиентского приложения также стремится к бесконечности, что следует из зависимости (5).

Таким образом, экспериментально мы показали, что для любой OLAP системы реального времени существуют ограничения на ее нормальное функционирование ввиду наличия определенного числа обновляющих транзакций и минимального интервала их следования. В данном эксперименте для описанной аппаратной платформы эти значения составили:

$$\begin{aligned} N_{\max} &= 35 \text{ обновляющих транзакций,} \\ I_{\min} &= 5,5 \text{ сек.} \end{aligned}$$

## **Заключение**

В данной работе были определены особенности процессинга многомерных кубов OLAP систем реального времени, а также основные критические характеристики данной архитектуры, влияющие на время ответа на пользовательские запросы, – максимальное число обновляющих транзакций и минимальный интервал их следования.

Экспериментальная часть данной работы показывает важность учета этих характеристик при проектировании подобных систем. Рассмотренные в статье проблемы носят, в основном, технологический характер.

## **Литература**

1. Архипенков С.Я., Хранилища данных. М.: Диалог-МИФИ, 2002. 560 с.
2. Хрусталёв Е.М. Агрегация данных в OLAP-кубах. // Открытые системы. 2003. № 5. С. 33–38.
3. Шуленин А.А. Масштабируемость аналитических систем. // Windows & .Net Magazine/RE. 2002. № 2. С. 13–17.

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ MS PROJECT

## А.А. Зарафьянц

В работе сформулированы рекомендации по применению MS Project для сбора метрик и графического исследования процессов в целях автоматизации управления разработкой программного обеспечения (ПО).

### Введение

Целью проектов разработки программного обеспечения, в том числе и программного обеспечения САПР, является: в заданный срок, с заданными бюджетом и ресурсами разработать программную систему, удовлетворяющую определенным спецификациям (требованиям заказчика).

### Управление проектом разработки ПО

Один из наиболее распространенных подходов к стандартизации управления проектом – подход Project Management Institute (PMI) [1]. Данный подход описывает задачи, которые необходимо выполнить для успешного выполнения проекта в любой сфере, в том числе и в сфере разработки программного обеспечения. Подход PMI нацелен на качественное выполнение проекта с заданными ограничениями ресурсов в срок. Он не исключает, а наоборот, дополняет специфические требования к проектам разработки ПО, описанные в [2].

Одной из важнейших задач управления проектом является задача контроля качества. Современные системы контроля качества строятся на основе сбора различных метрик (числовых и графических характеристик) процессов [3]. Качество ПО должно обеспечивать возможность решения сформулированных в спецификациях задач, качество необходимо для обеспечения конкурентоспособности.

### Спецификации и план

Наиболее распространенное средство управления проектами MS Project в целом отражает подход [1] и обеспечивает возможность графической репрезентации некоторых метрик проекта.

Вкратце остановимся на терминологии, за детальным описанием программы необходимо обращаться к специальной литературе, такой как [4] и документация MS Project.

Проектный план обычно задается в виде таблицы задач и диаграммы Ганта. Проект состоит из задач, связанных между собой в некоторые последовательности. Тип связи по умолчанию – FS (finish-to-start).

Существует важная возможность сохранить базовый план проекта и далее отслеживать корректировки этого плана. Также MS Project позволяет задавать процент выполнения задач и наглядно представляет стадии выполнения работ по проекту.

### Исследование процессов MS Project

Использование MS Project наиболее оправдано для проектов, где необходимо жесткое отслеживание исполнения графика работ и (или) отслеживание исполнения бюджета.

**Анализ критического пути.** В водопадной модели жизненного цикла ПО [5] по результатам этапа анализа спецификаций составляется структура разбиения работ (на этапе дизайна системы). После разбиения проекта на подзадачи необходимо установить связи между ними и оценить время их выполнения. Время выполнения обычно оценивается по формуле:

$$\text{Estimate} = (\text{Pessimistic} + 4 * \text{Likely} + \text{Optimistic}) / 6.$$

Для получения средней оценки берется пессимистическая, оптимистическая и учетверенная наиболее вероятная оценка. Сумма делится на шесть.

После оценки времени выполнения задач появляется возможность проводить оценку снизу вверх (bottom-up) сроков выполнения проекта и выполнять корректировки плана для его сокращения. Критический путь – наиболее длинный путь по последовательно связанным задачам от начала проекта к его завершению. Очевидно, что проект не может быть короче, чем его критический путь. MS Project автоматически выделяет критический путь на диаграмме Ганта или сетевой диаграмме. Работа по сокращению сроков проекта сводится к переоценке и перегруппировке задач критического пути.

**Вариация плана.** Проектный план редко бывает идеальным. Он постоянно корректируется как до, так и после начала выполнения его этапов. Для обеспечения возможности визуального исследования отклонения плана необходимо сохранять базовые планы проекта.

**Анализ достижения вех (Milestones).** При разработке ПО мы создаем план, ориентированный на deliverables – промежуточные результаты. Проект необходимо разбивать на этапы, разделенные вехами (milestones), к которым и приурочены эти промежуточные результаты (deliverable).

**Визуализация хода выполнения плана, линии продвижения работ.** По мере выполнения проектного плана необходимо вводить процент выполнения каждой из задач. Линии продвижения работ позволяют исследовать визуальное отображение состояния проекта на определенную дату.

**Автоматизация контроля за назначением ресурсов.** Для распределения задач по разработчикам необходимо вести учет ресурсов, корректно назначать их на задачи. Присвоение стоимости ресурсам позволяет строить бюджетные индикаторы проекта.

**Анализ бюджетных характеристик.** Объемы затрат на реализацию задач автоматически оцениваются MS Project. Их можно вычислять как для проектов внутри организации, так и учитывать альтернативные затраты на аутсорсинг, консалтинг и покупку компонентов.

### Пример применения MS Project

Исследование вариации диаграммы Ганта для выполненного проекта разработки программной системы – на примере базы данных учета комплектующих в производстве – проведем на основе рис. 1. С помощью этого реального примера проиллюстрируем основные приемы использования MS Project для автоматизации разработки ПО.

Как видно из рис. 1, проект начался 1 июня, и первоначальный план предполагал завершение и внедрение первой его версии к 1 сентября. В ходе разработки выяснилось, что первоначальная оценка трудоемкости не была точной (для задачи номер №4 потребовалось 4 вместо одного дня). На рисунке показана линия хода работ на 20 июля, за месяц до поставки готовой версии системы. К этому моменту выяснилось, что требуется выполнение дополнительных задач (с номерами 10 и 11), что ставит под угрозу реализацию проекта 20 августа (задача-веха номер 13). В реальности для выполнения задачи №4 в срок были привлечены дополнительные ресурсы (разработчик) к выполнению параллельной задачи №12 (реализации печатных форм). Это замедлило выполнение задач основным разработчиком, но позволило уложиться в срок.

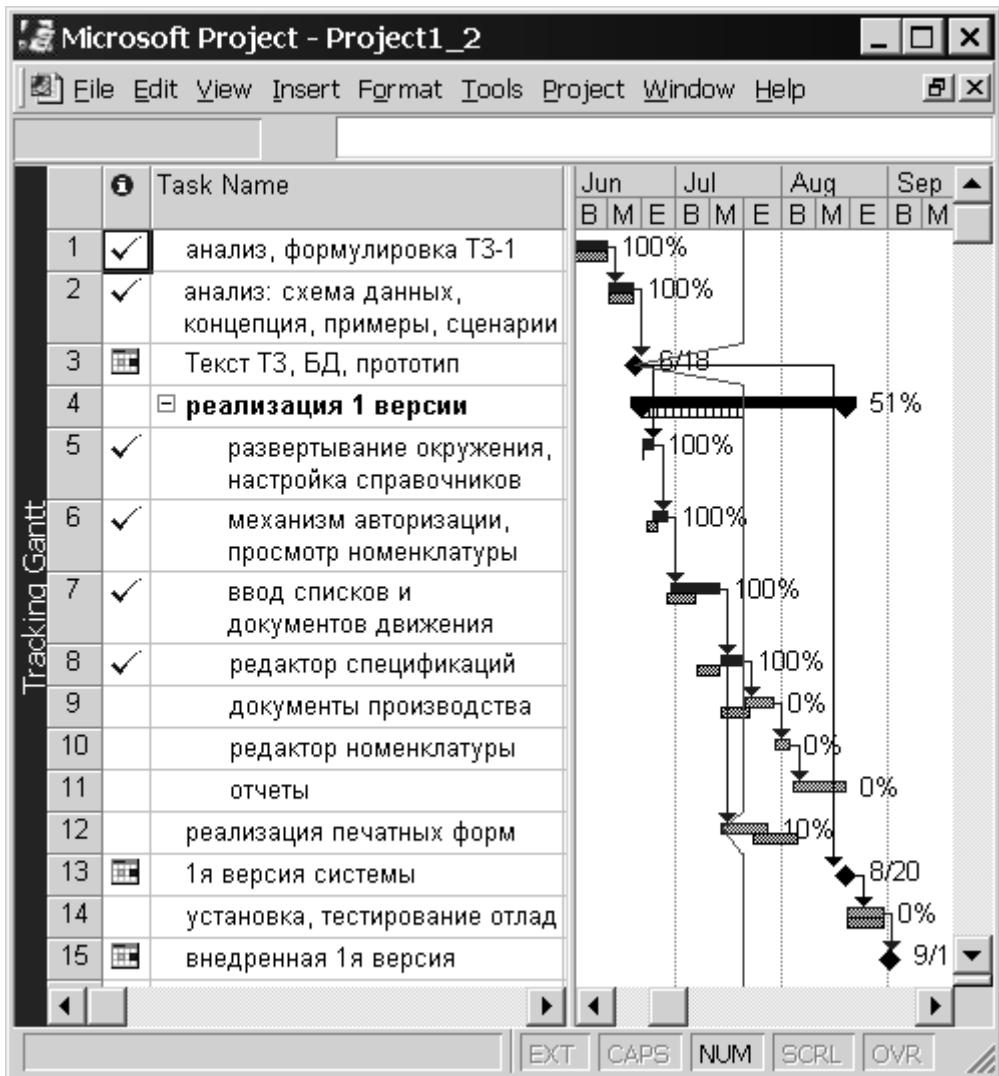


Рис.1. Отслеживание хода выполнения плана работ на примере реализации системы учета комплектующих

Данный пример иллюстрирует графическое исследование продвижения проекта на пути к достижению важных промежуточных результатов, совмещенных с вехами (milestones). Пример также иллюстрирует использование линий продвижения работ и процента выполнения задач для визуальной оценки состояния процесса разработки.

### Ограничения применимости и рекомендации

**Жизненный цикл.** Общая концепция априорного построения плана в виде диаграммы Ганта наиболее подходит для программного обеспечения, разрабатываемого по водопадной модели жизненного цикла, аналогичной моделям, применяемым при строительстве или ремонте. Различные варианты жизненного цикла программного обеспечения представлены в работе [5].

Обычно разработка ПО – это изобретение по требованию, где нет четкого представления о сроках, последовательности и трудоемкости задач. Жизненный цикл систем далеко не всегда свободно проецируется на водопадную модель, такой план зачастую будет постоянно перекраиваться, и дополнительные расходы ресурсов на его поддержание в актуальном состоянии перевесят выгоду от использования MS Project. Поэтому на ранних этапах разработки необходимо оценить выбранный жизненный цикл

ПО, и в некоторых случаях вовремя отказаться от использования MS Project. При этом MS Project все еще можно использовать в более крупных масштабах, например, когда в качестве задач ставится реализация подпроектов. Таким образом, существует баланс детальности плана: оптимальная детальность декомпозиции задач определяет, будут ли оправданы накладные расходы на поддержание плана в MS Project в актуальном состоянии. В таком случае для детального отслеживания выполнения задач приоритетным становится использование трекинговых систем и других систем автоматизации, описанных в [6], а также систем сбора метрик, описанных в [3].

**Нелинейность зависимости длительности задачи от количества ресурсов.** При использовании MS Project разработчики перечисляются в таблице ресурсов и назначаются для выполнения задач в соответствии с типом этих задач. Задачи бывают FD (fixed duration), FU (fixed units) и FW – (fixed work). Задачи могут иметь установленный флагок Effort Driven.

Рассмотрим, например, изменение сроков выполнения задач с фиксированной трудоемкостью (FW) с установленным флагжком Effort Driven. Настройки MS Project по умолчанию обеспечивают линейную зависимость между трудоемкостью и длительностью задач, что приводит к классической ошибке менеджеров программных проектов, описанной еще Бруксом в «Мифическом человеко-месяце» [7]: увеличение числа разработчиков, занятых в реализации некоторой задачи, зачастую лишь замедлит ход ее выполнения! Менеджерам необходимо очень аккуратно работать в поисках уменьшения длительности критического пути. Рекомендуем использовать сетевые диаграммы (network diagrams), в которых представление плана сфокусировано на зависимостях между задачами, вместо их продолжительности.

**Использование систем автоматизации разработки.** Для решения задач разработки ПО наряду с MS Project, используются следующие системы автоматизации процессов: системы учета изменений и дефектов (Tracking systems), системы совместного использования исходных кодов (Version control systems), специализированные системы поддержки процессов разработки, такие как RUP (Rational Rose) и специализированные инструменты и средства разработки и моделирования (Bpwin, Erwin, другие CASE средства).

Все эти средства, как и MS Project, позволяют автоматизировать сбор различных метрик процессов проекта.

## Заключение

При применении приведенных рекомендаций, учитывая особенности жизненного цикла программного обеспечения, MS Project может эффективно использоваться для задач анализа критического пути, вариации плана, исследования хода работ с помощью вех (milestones) и графиков выполнения задач, автоматизации водопадной модели жизненного цикла. Рекомендуется использовать MS Project для управления набором подпроектов, построения графиков и таблиц загрузки ресурсов, бюджетных индикаторов.

## Литература

1. A guide to the project management body of knowledge (Pmbook guide). Project management Institute Inc, 2000.
2. IEEE Standard for Developing Software Life Cycle Processes, IEEE Computer Society, New York, NY, 1995.
3. Software Measurement Process standard for Software Engineering (ISO/IEC 15939, 2002).
4. Гульяев. MS Project 2003 Professional. Управление проектами. М.: КОРОНА, 2004.

5. Зарафьянц А.А. Документирование жизненного цикла информационных систем. // Сборник трудов XXXIII научной и учебно-методической конференции СПбГУ ИТМО, 2004.
6. Технологии автоматизации управления жизненным циклом компьютерных программ. / Труды международных научно-технических конференций «Интеллектуальные системы (IEEE AIS'04) и «Интеллектуальные САПР» (CAD-2004) Научное издание в 3-х томах. М.: ИФМЛ, 2004. Т. 2. 468 с.
7. P. Brooks. *The mythical man-month*. Addison- Wesley Longman Inc, 1995.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕРВИСНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОДЫ

## А.В. Панков, П.В. Зелиюкин

В данной работе рассмотрено создание аналитической подсистемы информационно-аналитической системы техноцентра «Системы очистки воды», одной из задач которой является формирование эффективного графика сервисного обслуживания системы очистки воды.

### Введение

В данной работе рассматривается аналитическая подсистема информационно-аналитической системы техноцентра «Системы очистки воды», решающая задачу обеспечения оперативного мониторинга состояния качества воды с подбором эффективной конфигурации системы очистки воды, обеспечивающей необходимый уровень качества воды с последующей организацией планирования сервисного обслуживания.

Организация планирования сервисного обслуживания заключается в предоставлении оптимального графика эксплуатации системы, в соответствии с которым производительность системы остается на должном уровне при удовлетворяющем заказчика качестве воды, что подтверждается соответствующими лабораторными исследованиями. Для реализации поставленной задачи используются данные о поведении системы в процессе эксплуатации. В процессе эксплуатации ведется регулярный лабораторный контроль качества воды по различным показателям и технический контроль поведения системы как гидравлической. Организация сервисного обслуживания осуществляется на основании двух критериев: качество воды и производительность системы. Как только достигается критический уровень по одному из этих критериев, возникает необходимость в проведении сервисного обслуживания [ 1 ] /

Итак, для реализации задачи организации сервисного обслуживания системы очистки воды необходимо выполнить следующие шаги:

- ввод данных, полученных в результате эксплуатации системы очистки воды;
- анализ данных, полученных в результате эксплуатации системы очистки воды;
- вывод итоговых рекомендаций по составлению оптимального графика эксплуатации системы очистки воды.

### Сервисное обслуживание системы очистки воды

Как было отмечено выше, одним из критериев, на основании которого происходит формирование графика сервисного обслуживания, является качество воды. Отслеживание этого параметра происходит на основе данных лабораторных исследований воды, которые проводятся регулярно в процессе эксплуатации. Также возможно отслеживание этого критерия по показаниям счетчика прошедшей воды, при наличии в базе данных соответствующих протоколов исследований качества воды (по конкретным ступеням в конкретных регионах).

Большую трудность вызывает отслеживание второго критерия – производительности системы. Это вызвано рядом объективных причин:

- хаотично изменяющееся давление на входе системы, обусловленное несовершенством действующих в нашей стране водопроводных систем [2];
- неравномерность снижения производительности разных ступеней, когда значительное снижение производительности одной из ступеней влияет на производительность всей системы, при этом заменять, либо регенерировать нужно лишь эту единственную ступень, а не всю систему целиком;

- неравномерность изменения состава поступающей воды, что, в свою очередь, обусловлено сезонностью некоторых загрязнений, а так же рядом других причин, не зависящих от поставщика систем очистки воды [3].

Ввод данных, полученных в результате эксплуатации системы очистки воды, происходит в соответствующем окне программы, где и заполняется форма полученных эксплуатационных данных от пользователя системы очистки воды. Эта форма имеет следующие поля:

- дата – вводится дата снятия измерения;
- показания счетчика – записываются показания счетчика общего количества пропущенной воды на момент измерения;
- время протекания 10 литров воды – записывается производительность системы, т.е. количество воды, пропущенной через систему за единицу времени, снятая с соответствующего прибора (секундомер);
- давление на входе (выходе)  $i$ -ой ступени – записываются данные, снятые с  $i$ -го манометра.

### Математическая модель

Анализ данных, полученных в результате эксплуатации системы очистки воды, происходит с использованием математической модели, которая разрабатывалась для многоступенчатой системы очистки воды. В частном случае система состоит из 3-х ступеней механической очистки воды и одной ступени ультрафиолетовой обработки воды.

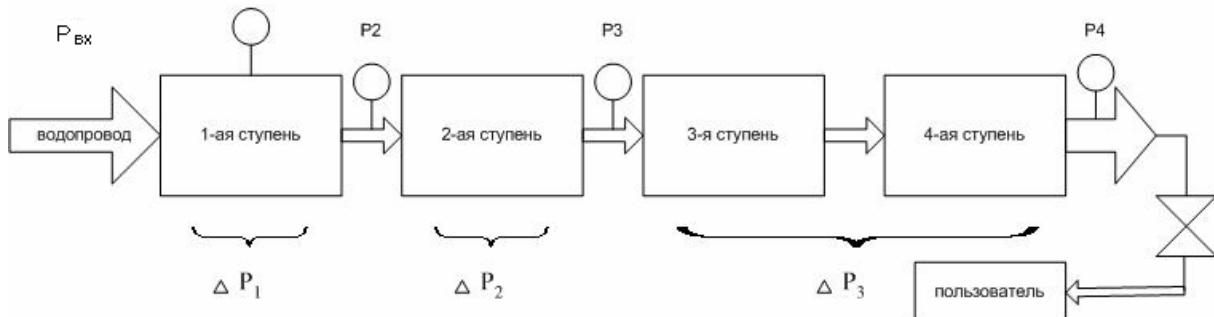


Рис.1. Гидравлическая схема четырехступенчатой системы очистки воды

Математическая модель разработана для оценки текущего состояния системы очистки воды как гидравлической. Производительность системы очистки является функцией внутреннего сопротивления гидравлической системы и давления на входе системы [3]. Сопротивление не измеряется, а оценивается через измерение падения давления.

Суммарное падение давления на ступенях системы очистки воды равно

$$\sum_{i=1}^n P_i - P_i = \Delta P_i + \Delta P_{i+1} + \Delta P_{i+2},$$

где  $\Delta P_i = P_{\text{вх}} - P_2$ ,  $\Delta P_{i+1} = P_2 - P_3$ ,  $\Delta P_{i+2} = P_3 - P_4$ , при  $i = 1$ ,  $P_i$ ,  $\Delta P_{i+1}$ ,  $\Delta P_{i+2}$  – падение давления на  $i$ -ой ступени;  $P_{\text{вх}}$  – значение действующего давления на входе системы очистки воды.

Контрольные приборы – манометры, которые используются в реальных эксплуатируемых системах, являются больше индикаторами, чем измерительными приборами, и имеют большие ошибки (большой разброс от прибора к прибору) и нестабильность

показаний во времени. В этой части математической модели осуществляется коррекция показаний манометра по формуле

$$P_i^* = P_{oi} * (1 - ((P_{3i} - P_{31}) / P_{31})),$$

где  $P_i^*$  – значение откорректированного давления на входе  $i$ й ступени при открытом кране системы;  $P_{oi}$  – значение давления на входе  $i$ -ой ступени при открытом кране системы;  $P_{3i}$  – значение давления на входе  $i$ -ой ступени при закрытом кране системы;  $P_{31}$  – значение давления на входе системы при закрытом кране. В формуле приняты допущения:

- значение давления, измеряемое на входе системы манометром №1, является величиной истинной;
- рассчитанная относительная погрешность в данный момент времени остается постоянной;

$$A_j = P_{3i} - P_{31};$$

$$a_j = A_j / P_{31} = (P_{3i} - P_{31}) / P_{31};$$

$$P_i^* = P_{oi} * (1 - a_j),$$

$A_j$  – абсолютная ошибка  $j$ -го измерения;  $a_j$  – относительная погрешность  $j$ -го измерения.

Особенность данных, полученных в процессе эксплуатации, состоит в том, что система работает не в стационарном режиме с точки зрения давления на входе, т.е. давление в водопроводной сети меняется случайным образом. Поэтому было принято решение о необходимости приведения действующего давления на входе и производительности к постоянному давлению на входе системы по формуле [2]

$$P_i^* = P_{oi} * (P_n / P_{o1}),$$

где  $P_i^*$  – значение приведенного давления к величине нормирующего давления;  $P_{oi}$  – значение давления на входе  $i$ -ой ступени при открытом кране системы;  $P_n$  – значение нормирующего давления;  $P_{o1}$  – значение давления на входе системы при открытом кране.

Далее следует оценка текущего состояния системы на экспериментальных данных. Аналитическая подсистема позволяет обработать несколько объектов.

Вывод итоговых рекомендаций по составлению оптимального графика эксплуатации системы очистки воды производится специалистом техноцентра на основе графиков, построенных в результате обработки информации, полученной от пользователя системы. На графиках представлены результаты обработки данных при изменении давления на входе. На этих же графиках представлены зависимости, приведенные к постоянному давлению на входе системы очистки воды.

## Заключение

В работе описана аналитическая подсистема информационно-аналитической системы, которая позволяет, кроме выполнения функции подбора системы очистки воды, еще и автоматизировать составление графика сервисного обслуживания, в результате выполнения которого заказчик получит возможность пользоваться системой очистки воды, удовлетворяющей его по качеству и производительности. Внедрение этой разработки может послужить улучшению качества воды, и, как следствие, состояния здоровья населения, а также уменьшить последствия воздействия вредных экологических факторов. Параллельно с этим однозначно облегчается работа оператора, задачей которого является поддержание качества и производительности подобранный системы.

## Литература

1. Саймон Д. Программирование в Excel. СПб: Диалектика, 2002.
2. Горев А., Макашарипов С., Ахаян Р. Эффективная работа с СУБД. СПб: Питер, 1997.
3. <http://www.geizer.ru>.

# АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ ОЧИСТКИ ВОДЫ

## А.В. Панков, А.А. Ясырев

В данной работе рассмотрено создание автоматизированной системы, направленной на создание полной базы данных по физико-техническим характеристикам фильтров, о состоянии воды в различных регионах. Данная система позволяет осуществлять быстрый подбор наиболее подходящей структуры системы очистки, на основе которой формируется проект системы.

### Введение

Согласно статистическим данным, четверть населения города Санкт-Петербург пользуются водой, очищенной при помощи дополнительных фильтров. В этом отчасти повинен тот факт, что мониторинг качества воды осуществляется водоканалом на выходе из водоподготовительных сооружений [3], но по мере протекания по трубам ее показатели ухудшаются в связи с плохим качеством трубопровода. Степень возникающего в них загрязнения индивидуальна в каждом конкретном случае и может варьироваться в значительных пределах. Поэтому особенно важно обеспечить оперативный сбор, анализ и обработку информации об экологическом состоянии воды в разных местах и осуществление подбора оптимальной системы очистки, обеспечивающей необходимый уровень качества воды для каждого конкретного случая. Это позволит населению существенно оберегать свое здоровье и здоровье будущего поколения, причем с достижением максимального эффекта. Актуальность разработки устройств финишной обработки воды определяется тем, что проблему получения доброкачественной питьевой воды без устройств финишной обработки сегодня решить практически невозможно. Существующий большой объем информации по воде, которую необходимо очищать, и большой объем информации по приборам, которые возможно использовать, позволяет проводить аналитические исследования. Но использование ручного труда для подобных целей малоэффективно, так как сопровождается долгим процессом подбора информации по каждому индивидуальному случаю. В то же время использование в данной деятельности автоматизированных систем позволяет многократно повысить производительность труда, захватить большее число аспектов каждой конкретной ситуации.

### Выбор среды разработки

Из СУБД, работающих под операционными системами группы Win 32, для данного проекта выбрана система Borland Delphi 7 и MS Access 2000.

СУБД MS Access2000 была выбрана по следующим причинам. В этой системе имеется поддержка языка SQL, удобная система хранения данных (таблица с данными, индексы, запросы, формы для ввода-вывода данных хранятся в одном файле). Система отличается простотой и удобством создания таблиц, включающих в себя большое разнообразие типов данных [2].

Система Borland Delphi 7 была выбрана по следующим причинам. Система предназначена для работы под операционными системами MS Windows (Win32), из всех систем управления базами данных данная система обладает наибольшими возможностями. Так как система – открытая, с возможностью подключения дополнительных модулей, возможность использования готовых модулей различных производителей значительно упростит задачу по разработке системы. Наличие компонент, реализующих интерфейс с механизмом Ole Automation, интерфейс OLE DB, интерфейс ADO, упрощает разработку системы взаимодействия с другими приложениями Windows. Развитые средства разработки самого пакета Borland Delphi 7 позволяют в случае необходимости разрабатывать дополнительные модули средствами других языков. Система не предъ-

являет чрезмерных требований к ПК (как Oracle) [1], что позволяет ее использовать на самых разнообразных компьютерах.

Связующим интерфейсом между программой, разработанной в Borland Delphi 7, и файлом базы данных MS Access2000 (\*.mdb) является ADO (Active Data Objects) – это новый высокогорневый компонент технологии доступа к данным от Microsoft. ADO – более новая технология, чем ODBC, она работает через интерфейс OLE DB. ADO позволяет работать с файлом MS Access2000 без наличия самой СУБД MSAccess, что позволяет создавать полноценные локальные базы данных, основанные на архитектуре клиент-сервер, имеющие возможность работы без приложения сервера (MS Access) [1].

Часть функций программы выполняется с использованием приложений Office. В частности, подсистема анализа активно использует MS Excel, а MS Word был выбран для формирования выходной документации. Приложения Office поставляют сервера COM, которые предоставляют интерфейс доступа к приложению и его объектам. Благодаря этому разработчик в среде Delphi имеет возможность управлять сервером, используя специально для этого имеющиеся средства Delphi.



Рис.1. Инициализация пакета прикладных программ

При запуске системы осуществляется начальная инициализация ее параметров. При этом инициализируются переменные состояния системы, которые обеспечивают механизм взаимодействия объектов. Ключевыми переменными состояния системы яв-

ляются переменные BDName (путь к базе данных), Cstring(строка установления связи с сервером). Кроме того, осуществляется инициализация серверов Ole Automation для основных типов данных, используемых в базе данных в целях ускорения процесса взаимодействия с ними. Также в процессе начальной инициализации создается главное окно программы, которое содержит пользовательское меню, панель инструментов, окно дерева объектов и статусную строку. Схема инициализации представлена на рис.1.

### **Взаимодействие модулей системы между собой**

Модули, составляющие систему, делятся на две группы – модули анализа данных и модули занесения и вывода данных, поступающих от пользователя в базы данных системы.

Модуль занесения и вывода данных, или редактор базы данных, представляет собой программу, которая принимает данные от пользователя, введенные в специальные экранные формы и окна диалога, сохраняет их в базах данных системы в соответствии с заранее заданной структурой и выводит в отчеты MSWord. После занесения данных в базу этими данными могут пользоваться различные модули анализа. Для определения того, с какими, собственно, данными они работают, существуют служебные базы описания баз данных. В результате работы модулей анализа могут появляться различные новые данные, которые также сохраняются в базе данных системы для их дальнейшего использования.

### **Взаимодействие объектов подсистемы между собой**

Объекты, составляющие подсистему, делятся на две группы – отображаемые и неотображаемые объекты.

Отображаемые объекты – это те объекты, которые пользователь непосредственно видит на мониторе и в окнах программы. Такими объектами являются, например, основное окно программы (TMainForm), содержащее главное меню программы и иерархическую модель структуры базы данных, окна, отображающие интерфейс соответствующих таблиц. Отображаемые объекты могут являться так называемыми «контейнерами», т.е. содержать другие отображаемые объекты. Например, объект TMainForm является контейнером и содержит такие объекты, как пользовательское меню (TMainMenu), дерево объектов (TTreeView) и т.д. В свою очередь, эти объекты могут также являться контейнерами: объект TMainMenu содержит комплекс объектов – пунктов меню (TMenuItem). Формы приложения принадлежат к объектам класса TForm, кнопки – к объектам класса TButton. Визуальное отображение таблиц осуществляется с помощью объектов класса TDBGrid, также в интерфейсе программы используются объекты классов TDBMemo, TDBEdit, TDBNavigator, TTreeView и др. [1]. Неотображаемые объекты – объекты, не видимые пользователю и осуществляющие служебные функции. К ним относятся компоненты, осуществляющие доступ к файлу базы данных и работу с ним, подключение к СОМ-серверам Word и Excel. Работу с базой данных осуществляет компоненты класса TADOTable и TADOConnection. Работа с Word и Excel осуществляется с помощью компонентов класса TWordApplication, TWordDocument, TExcelApplication и TExcelWorkbook [1].

Как отображаемые, так и неотображаемые объекты взаимодействуют между собой и с пользователем посредством механизма событий.

В случае возникновения каких-либо событий (например, нажатие клавиши пользователем) система определяет объект, отвечающий за реакцию на это событие, и сообщает ему о необходимости осуществления тех или иных действий.

## **Заключение**

В работе осуществлено создание системы, направленной на создание полной базы данных по устройствам финишной очистки воды. В ней находятся физико-технические характеристики фильтров, информация о производителях фильтров и комплектующих, протоколы исследования воды в регионах и протоколы испытаний фильтров, а также материал в различных форматах программного обеспечения, работающего под Windows. Аналитическая часть позволяет обеспечить быстрый подбор наиболее подходящей структуры системы очистки, на основе которой формируется проект системы. В результате обеспечивается оптимальная по скорости и качеству работа по упорядочиванию, хранению и редактированию данных и по обслуживанию клиентов. Таким образом, внедрение этой разработки может послужить улучшению состояния здоровья населения и уменьшить последствия воздействия вредных экологических фактов. Фактические интерфейса внешних модулей и поддержки механизма Ole Automation и ADO дают возможность взаимодействия программы с продуктами других разработчиков, которые могут обеспечить расширение функциональности системы без изучения другими разработчиками ее внутренней структуры.

## **Литература**

1. Фаронов В.Н. Программирование баз данных в Delphi 6. СПб: Питер, 2003.
2. Дубнов П.Ю. Access 2000. Проектирование баз данных. М.: ДМК, 2000.
3. <http://www.geizer.ru>

# ОРГАНИЗАЦИЯ ВИРТУАЛЬНОГО СЕКРЕТНОГО КАНАЛА СВЯЗИ

## А.В. Лобанцев, А.Л. Гурков

В настоящее время наблюдается тенденция к расширению и росту компаний, их сфер влияния и деятельности. Компании занимают глобальные рынки, расширяют сеть сбыта, приобретают множество партнеров по всему миру. В данной обстановке неоспоримо важной деталью является организация быстрой, безопасной и надежной связи везде, где расположены их офисы и сотрудники.

Исторически сложилось так, что для защиты передаваемой на большие расстояния информации компании прокладывали собственные линии связи. Этот способ имеет ряд существенных недостатков – не гарантирует надежной защиты коммуникаций, значительно ограничен в применении и требует больших затрат средств и времени. Конечно, существует большое количество открытых коммуникационных каналов, которые можно арендовать у провайдеров связи или Интернета. Но они также не обеспечивают защиту информации, ее конфиденциальность, аутентичность, целостность, что непримлемо для реального бизнеса.

Благодаря развитию криптографических технологий появился способ преодолеть эти ограничения – использовать технологию защищенных виртуальных частных сетей (Virtual Private Network – VPN), надежно шифрующих информацию, передаваемую по дешевым открытым сетям, включая Интернет.

Маркетинговая трактовка товара подразумевает, как минимум, две его сущности: потребительскую и физическую.

Потребительская сущность VPN – «виртуальный защищенный туннель, или путь», с помощью которого можно организовать удаленный защищенный доступ через открытые каналы Интернета к серверам баз данных, Web, FTP и почтовым серверам. Физическая сущность технологии VPN определяется тем, что она может защитить трафик любых информационных интранет- и экстронет-систем, аудио-видеоконференций, систем электронной коммерции и т. п.

Существует три аспекта восприятия VPN:

- VPN – это защита трафика, основанная на криптографии;
- VPN – это средство коммуникации, так как гарантия защиты доступа к внутренним ресурсам из любой точки страны или мира инициирует применение информационных систем для удаленного доступа;
- VPN – это средство влияния на стратегию развития коммуникационных систем корпорации: вместо того, чтобы вкладывать огромные средства в строительство собственных выделенных линий, можно практически сегодня же получить надежно защищенные каналы связи от коммуникационных провайдеров.

Для руководителя, принимающего решение об установке тех или иных средств или систем, важна и финансовая сущность применения VPN. При правильном выборе VPN:

- формируются защищенные каналы связи и защищенный трафик отдельных приложений по цене доступа в Интернет, что в несколько раз дешевле собственных линий;
- при установке VPN не требуется изменять топологию сетей, переписывать приложения, обучать пользователей, т.е. тратить дополнительные средства;
- обеспечивается масштабирование: VPN не создаст проблем роста, что сохранит уже сделанные раньше инвестиции в инфраструктуру безопасности.

Существует три типовых решения, которые последовательно решают основные задачи корпораций по защите передаваемой информации и созданию системы информационной безопасности:

- защита всего трафика между многочисленными офисами корпорации, когда шифрование выполняется только на выходе из офисов во внешние сети; такая топология образует «защищенный периметр» вокруг локальных сетей корпорации (рис. 1);
- защищенный доступ удаленных пользователей к информационным ресурсам, как правило, через Интернет (рис. 2);
- защита трафика ряда приложений внутри корпоративных сетей (это также важно, поскольку большинство атак осуществляется из внутренних сетей), при этом образуются отдельные, непересекающиеся VPN для выделенных групп пользователей или приложений (рис. 3).



Рис.1. Защита трафика между офисами корпорации

Виртуальная частная сеть VPN, как любая распределенная система, в ее «физической сущности» является сложным комплексом, который требует целого ряда дополнительных комплементарных средств и систем защиты. Ее способность шифровать данные является необходимым, но далеко не достаточным условием для построения действительно надежной защиты. Здесь мы рассмотрим, что должна делать «правильная» VPN, каким отвечать требованиям и как интегрироваться с другими средствами защиты информации.

Основная задача VPN – защита трафика. Эта задача исключительно сложна уже на криптографическом уровне, поскольку VPN должна удовлетворять большому числу требований, в первую очередь, обладать надежной криптографией, гарантирующей от прослушивания, изменения, отказа от авторства (это определяется протоколом IPsec), иметь надежную систему управления ключами, защищать от «подыгрывающих» (replay) атак и проверять, «жив» ли абонент в данный момент (это обеспечивается протоколом IKE). Применение стандартных протоколов IPsec/IKE в VPN-системах сегодня практически обязательно. В противном случае ни один заказчик не сможет быть уверенными, что поставщик VPN создал криптографически целостную и надежную систему. Кроме того, в будущем она окажется несовместимой с VPN, применяемыми контрагентами корпорации, что в конце концов приведет к проблеме «авилонской башни».

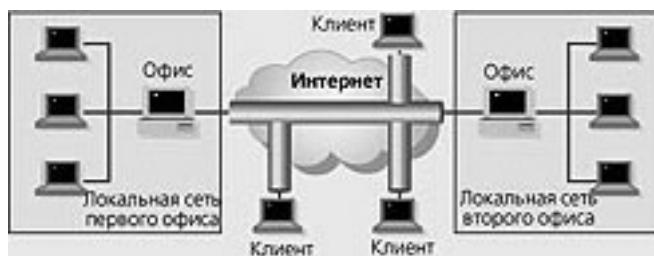


Рис. 2. Защищенный доступ удаленных пользователей

Следующим требованием является обеспечение масштабируемости конкретной VPN. Многолетний опыт показывает, что наиболее успешно для этого применяются программные VPN-агенты, которые:

- могут обеспечить защиту трафика на всех типах компьютеров – рабочих станциях, серверах и шлюзах (на выходе из локальных сетей в открытые сети);
- работают на всех популярных ОС.

Вторая составляющая масштабируемости – централизованное, целостное и оперативное управление VPN. Необходимо определиться со значениями этих понятий в данном контексте:

- централизованное – конфигурирование VPN происходит в одном месте на одной рабочей станции;
- целостное – вся VPN создается как единое целое, поскольку совершенно недопустима ситуация, когда разные узлы имеют несовместимую политику безопасности или включаются в VPN не одновременно;
- оперативное – созданная в центре «конфигурация VPN» должна автоматически за считанные секунды быть разослана на все узлы VPN. Для больших систем неприемлемо, чтобы оператор последовательно, пусть и удаленно, конфигурировал все 300 VPN-узлов или передавал им конфигурации на дискетах.

Наличие приведенных составляющих в системе управления VPN действительно обеспечит ее масштабируемость, поскольку при росте числа участников система будет расширяться без коллизий.

Для предоставления удаленного доступа мобильным пользователям центр управления должен допускать подключение компьютеров, IP-адрес которых ему заранее неизвестен.

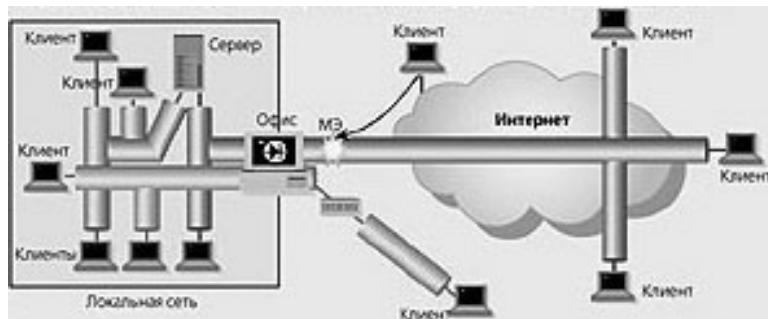


Рис. 3. Защита трафика приложений внутри корпоративной сети

Участники информационного обмена опознаются по их криптографическим сертификатам. Так как криптографический сертификат пользователя является электронным паспортом, он, как и любой паспорт, должен соответствовать определенным стандартам. В криптографии это X.509.

Требование к поддержке стандарта X.509 далеко не случайно. Не секрет, что ни одна криптозащита, построенная на открытой криптографии, не может существовать без инфраструктуры открытых ключей – PKI (Public Key Infrastructure), в задачу которой входит:

- создание и подпись сертификатов, что требует наличия иерархической системы нотариусов, так как пользователь VPN должен получать свой сертификат по месту работы, а не ездить за ним, например, в центральный офис или в какую-то иную организацию;
- передача сертификатов на электронный носитель пользователя (смарт-карта, e-token, дискета) и публикация их на сервере сертификатов с тем, чтобы любой участник VPN мог легко получить сертификат своего партнера;
- регистрация фактов компрометации и публикация «черных» списков отзываемых сертификатов.

VPN должна взаимодействовать с системой PKI в целом ряде точек (передача сертификата на подпись, получение сертификата и «черного» списка при установлении взаимодействия и т.п.). Очевидно, что это взаимодействие с чуждой по отношению к VPN системой может осуществляться только при условии полной поддержки международных стандартов, которым удовлетворяет большинство современных PKI-систем (например, Baltimore, Entrust, Verisign ).

Следующим важным элементом интеграции систем является наличие криптоинтерфейса. Любая система, использующая криптооперации (VPN, защищенная почта, программы шифрования дисков и файлов, PKI), должна получать криптосервис из сертифицированных соответствующими органами крипtoplагинов, созданных специализирующимися в этом компаниями. Исключительно опасно доверяться поставщику VPN, создавшему свой собственный, никому не известный, но, как он утверждает, надежный алгоритм.

Обеспечение безопасности – задача построения множества линий обороны и наблюдения за ними. Как бы ни осуществлялось это наблюдение – ручной разборкой регистрационной информации или с помощью изощренных систем *intrusion detection* (обнаружения вторжения), необходимо сначала получить эту информацию для «разбора полетов». Чтобы это было возможно, VPN должна создавать на всех своих агентах:

- LOG-файлы с регистрационной информацией;
- SNMP-сообщения о текущих атаках, сбоях и проблемах.

Вся эта информация должна собираться и обрабатываться в том же центре управления, о котором говорилось выше, или в одной из специализированных систем наблюдения (типа HP-OV).

Обычно VPN различает только отдельные компьютеры, но не их пользователей. Корпоративный заказчик требует, чтобы VPN отличала отдельных пользователей и отдельные приложения. Пользователь должен получить одну и ту же конфигурацию VPN независимо от того, за каким компьютером он сидит. Все необходимые для этого данные (ключи, сертификаты, конфигурация) находятся на его смарт-карте, электронном ключе или диске. Если корпорация использует так называемые серверы доступа (технология *single-sign-on*), то VPN должна работать совместно с такой системой, не подключая VPN тем пользователям, которые не прошли авторизацию в системе аутентификации.

VPN образует «непроницаемые» каналы связи поверх открытых сетей. В реальной жизни организации всегда требуется, чтобы сотрудники имели доступ из VPN в открытые сети и Интернет. Контроль в критичной точке контакта с открытой сетью должен осуществляться межсетевыми экранами. Более правильная ситуация – VPN обеспечивает функции межсетевого экрана в каждой точке, где есть ее агент. Такой «распределенный» межсетевой экран контролируется из того же центра безопасности. Межсетевой экран и VPN являются комплементарными системами, решая две связанные задачи:

- использование открытых сетей в качестве канала недорогой связи (VPN);
- обеспечение защиты от атак из открытых сетей при работе с открытой информацией, содержащейся в этих сетях (межсетевой экран).

Гарантируя защиту передаваемой информации, VPN не обеспечивает ее защиту во время хранения на конечных компьютерах. Эта задача решается целым рядом специальных средств:

- систем криптозащиты файлов и дисков (а также почты);
- систем защиты от несанкционированного доступа к компьютерам;
- антивирусных систем и т. п.

Необходимо обратить внимание на сложную взаимосвязь продуктов защиты информации. Например, система защиты компьютера от несанкционированного доступа

должна работать с теми же смарт-картами, что и VPN, а это требует реализации в обеих системах единого интерфейса доступа к смарт-карте (например, PKCS#11 фирмы RSA).

«Правильные» средства защиты информации должны обладать следующим набором характеристик:

- соответствие открытым международным стандартам;
- открытые интерфейсы к другим средствам защиты информации;
- способность взаимодействовать с одними и теми же «интегрирующими» элементами системы;
- способность к масштабированию.

Продукты, создаваемые для защиты информации, должны быть совместимы с системами PKI, известными на российском рынке, прежде всего с сервером сертификатов – программным средством управления VPN. Сервер сертификатов предназначен для хранения в виде базы данных открытых сертификатов всех пользователей VPN. Он осуществляет автоматическую раздачу сертификатов VPN-устройствам и взаимодействие с внешними системами PKI.

Рассмотрев концепцию организации виртуального туннеля средствами VPN, мы можем сказать, что можно обеспечить надежное, гибкое, недорогое, масштабируемое и прозрачное решение для объединения отдельных корпоративных сетей в одну большую сеть. Использование технологии VPN и ее защитных механизмов позволяет компаниям расширить границы бизнеса без увеличения риска уязвимости их информационных активов.

### Литература

1. <http://www.ietf.org>
2. <http://www.ietf.org/html.charters/ipsec-charter.html>
3. <http://www.ietf.org/html.charters/pkix-charter.html>
4. <http://www.ietf.org/html.charters/spki-charter.html>
5. <http://www.ietf.org/html.charters/pppext-charter.html>
6. <ftp://ftp.isi.edu/innotes/rfc1928.txt>
7. [http://www.onlamp.com/pub/a/security/2004/10/21/vpns\\_and\\_pkis.html](http://www.onlamp.com/pub/a/security/2004/10/21/vpns_and_pkis.html)
8. [http://www.onlamp.com/pub/a/security/2004/09/23/vpns\\_and\\_pkis.html](http://www.onlamp.com/pub/a/security/2004/09/23/vpns_and_pkis.html)
9. <http://www.findvpn.com>

# МЕТОДОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЕКТНЫХ ПРОЦЕДУР

## И.Б. Бондаренко, Ю.А. Гатчин

Разработанные в работе методы оптимального проектирования технологических систем реализованы в проектных процедурах САПР технологических процессов (ТП) оптического производства. Апробация программно реализованных методов на ТП вытягивания оптоволокна позволила подтвердить эффективность разработанных методов.

### Введение

При проектировании сложных технологических систем (ТС) оптического производства от проектировщика требуется учитывать множество внешних и внутренних параметров разрабатываемой системы, а также их взаимосвязь. Для современных систем проектирования необходимо не только обеспечить ввод, хранение и обработку альтернативных вариантов подсистем, но и сделать возможным оптимизацию проектных решений на основе математического аппарата методов и быстрых алгоритмов. Для обеспечения баланса цены с качеством систем проектирования необходима тщательная проработка САПР сложных ТС на всех этапах ее жизненного цикла, особенно на начальном этапе, который характеризуется наибольшей сложностью из-за многомерности и многокритериальности функции эффективности, а также широкого спектра методов ее оптимизации. Обработка и анализ вручную проектных процедур является сложной, а чаще всего невозможной задачей из-за сложности математического и программного аппарата и из-за многокритериальности обрабатываемых функций. Поэтому разработка систем автоматизации проектирования должна включать:

- формирование математического аппарата, пригодного для описания данного объекта проектирования;
- создание базы данных математических моделей для осуществления выбора из них альтернативного варианта;
- разработку методов принятия проектно-конструкторских решений, на основе которых создается объект заданного назначения.

Несмотря на все многообразие математических методов, оптимизацию необходимо вести автоматизировано с участием человека-оператора, которому предоставляется в системе проектирования автоматизированное рабочее место. В качестве базисных проектных процедур принятия оптимальных решений необходимы:

- декомпозиция задачи проектирования сложных ТС, решение частных/локальных оптимизационных задач;
- получение общего решения путем свертки локальных решений;
- разработка развитой системы выбора альтернативных вариантов на основе предпочтений проектировщика и априорных данных;
- формирование базы знаний и быстрого поиска по ней требуемых вариантов.

Из-за все возрастающей сложности ТС и роста параметрического пространства описания объектов проектирования возникает необходимость в разработке структуры системы принятия оптимальных проектных решений, а также в объединении разработанных алгоритмов и процедур в единую систему – пакет прикладных программ (ППП) с развитой системой управления работой ее модулей. В связи с новизной применения аппарата методов оптимизации при проектировании сложных ТС оптического производства методология, описанная ниже, представляет научную новизну и актуальна.

### Теоретические аспекты

Задача проектирования сложных ТС разбивается на ряд локальных задач со своей функцией цели [1, 2]:

$$\Phi = (\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_i),$$

$$\Phi_i = \text{extr}(Q_i(X)),$$

$$Q_i(X) = Q_i(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $x_n$  – параметр оптимизируемой системы,  $n$  – размерность задачи. С другой стороны, задача проектирования интерпретируется как отыскание наилучшего варианта – альтернативы  $a$  на множестве  $A$  с заданным множеством ограничений, тогда

$$\Phi = \text{optim} \Phi_i(a).$$

В обоих случаях задача математически сводится к отысканию оптимума функции в области, заданной с помощью ограничений с необходимой точностью. Так как сложные ТС характеризуются большим количеством параметров, то, следовательно, необходима разработка методов, позволяющих отыскивать экстремумы многомерных функций с помощью быстрых алгоритмов. Сравнительный анализ методов также необходим для оценки предпочтительности в каждом конкретном случае.

Для реализации процедуры свертки локальных критериев  $\Phi_i$  в глобальный разработаны методы, использующие выражения [3]:

$$\Phi = \sum_{i=1}^m k_i \Phi_i; \quad \Phi = \frac{m}{n} \Phi_i^{k_i}; \quad \Phi = \left[ \sum_{i=1}^m k_i / \Phi_i \right]^{-1},$$

где  $i=1, \dots, m$  – количество локальных критериев;  $k_i$  – весовые коэффициенты, которые определяются по результатам экспертной оценки важности локальных критериев.

Выбор из трех форм представления локальных критериев осуществлен на основе анализа чувствительности влияния внутренних параметров на внешний по соотношению

$$S = \frac{\Delta \Phi}{|\Delta X|}, \quad |\Delta X| = \left( \sum_{j=1}^m \Delta x_j^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где в качестве  $x$  могут выступать количество локальных критериев, весовые коэффициенты, уровни локальных критериев, уровни помехи и т.п.

Задача отыскания экстремума многомерной функции решается одним из методов оптимизации:

- перебора на равномерной/неравномерной сетке;
- многошаговой редукции размерности;
- поиска по кривой Пеано;
- оптимального покрытия прямоугольного покрытия прямоугольного многомерного параллелепипеда равными кубами;
- многомерного поиска с помощью стохастического автомата;
- с помощью коллектива независимых автоматов.

Математическое описание методов [4] не приводится из-за ограниченного объема данной статьи.

Накопление результатов об альтернативных вариантах, их характеристиках, ограничениях, результатах имитационного моделирования производится в базах данных (БД) и базах знаний (БЗ) реального времени с использованием технологии искусственного интеллекта. Они должны позволять накапливать и осуществлять по запросу проектировщика быстрый поиск накопленных данных.

Кроме нахождения альтернатив с помощью оптимизации функций, проектировщик имеет возможность их выбора по априорным вероятностям, исходя из максимизации выгоды от проведения эксперимента  $e$ :

$$u^*(e, z) = \max u^*(a, e, z),$$

где  $u^*(e, z)$  – ожидаемая выгода от выполнения эксперимента  $e$  с результатом  $z$ .

Выбор альтернатив может осуществляться и качественно, исходя из предпочтений проектировщика, а также используя правила отбраковки, сужающие множество альтернатив А. Для этого используется процедура последовательного анализа и отсева вариантов

$$W_j = W_{j-1} \setminus \Omega_j.$$

Проводится последовательно  $k$  итераций, в ходе которых имеющееся множество конкурирующих вариантов  $W_{j-1}$  сужается до  $W_j = W_{j-1} \setminus \Omega_j$  на  $j$ -м шаге [5].

Таким образом, были разработаны базисные процедуры, использованные при проектировании сложных ТС оптического производства.

### Практическая реализация разработанных процедур

Для реализации предложенных процедур описанные выше алгоритмы и методы были алгоритмизированы на языке высокого уровня и скомпонованы в подсистему САПР ТС. Полученная подсистема была апробирована на ТП оптического производства вытягивании оптического волокна. Модель ТП описывается теоретически зависимостью скорости вытягивания:

$$V_e = \frac{AF}{\eta_0} e^{\frac{E_a}{RT}},$$

где  $F$  – сила натяжения;  $A$  – постоянная для данного типа волокна, в которую входят геометрические размеры;  $\eta_0$  – вязкость в центре волокна;  $E_a$  – энергия активации вязкого течения (для кварцевого стекла энергия активации составляет 600 кДж/моль);  $T$  – абсолютная температура;  $R$  – газовая постоянная.

Задача оптимизации – найти оптимальные параметры выражения, т.е. силу вытягивания  $V_e^*$  и температуру процесса  $T^*$ , при которых скорость вытягивания будет максимальна. Это позволит найти предел производительности установки по производству волокна при заданных ограничениях:

- для кварцевого стекла диапазон температур составляет 2173–2523 К, ниже него вытягивание невозможно, а выше – расплав становится слишком мягким, и велика вероятность разрыва волокна;
- максимальная скорость вытягивания, характерная для данного вещества, не более 200 м/мин.
- максимальное усилие вытягивания 100 гр.

Таким образом, целевая функция примет вид:

$$V_e^* = \max \frac{AF}{\eta_0(T)} e^{\frac{E_a}{RT}}.$$

$$V_{\%} \leq 200, \quad F \leq 100, \quad 2173 \leq T \leq 2523.$$

Исследование зависимости разработанная подсистема начинает с использования соотношений свертки локальных критериев в глобальный. Так как локальный критерий всего один, то операция свертки не требуется. Далее система переходит к процедуре

расчета чувствительности функции на изменение параметров. В результате работы процедуры получены данные, представленные в табл. 1.

Параметр	Значение чувствительности	Порядок исследования
$F$ – усилие вытягивания, г	1277	1
$T$ – температура, К	438449	2

Таблица 1. Результаты работы подпрограммы расчета чувствительности

Таким образом, порядок исследования параметров с помощью разработанных методов оптимизации определен как  $\{F, T\}$ .

Далее система оптимизирует целевую функцию, выбирая метод, исходя из результатов ранжирования по важнейшим параметрам – количеству переменных в методе, сложности метода, объему занимаемой памяти, сложности диспетчеризации, надежности нахождения экстремума. Из результатов ранжирования для исследуемой функции проектировщик делает вывод, что для данного случая необходимо использовать эффективный метод поиска с использованием минимальных ресурсов ЭВМ. Размерность задачи невелика, поэтому наиболее приемлемым является поиск экстремума на равномерной сетке. Если метод не даст положительных результатов, то проектировщику необходимо будет вернуться и применить другой метод оптимизации.

Входные и полученные данные при работе системы по определению оптимальных значений представлены в табл. 2.

Параметр	Ограничение на параметр	Оптимальное значение	Число шагов для отыскания каждого параметра
$F$ , г	$<100$	99,96183	67552
$T$ , К	$2173 < T < 2523$	2319,449	85693
$V_B$ , м/мин	$<200$	200	153245

Таблица 2. Результаты работы метода поиска на равномерной сетке

Таким образом, при значении параметров усилия вытягивания и температуры  $\{99,96 \text{ г}; 2319,45 \text{ К}\}$  установка будет обладать максимальной производительностью 200 м/мин. График зависимости числа шагов поиска от значения исследуемой функции  $V_B(F, T)$  приведен на рис. 1.

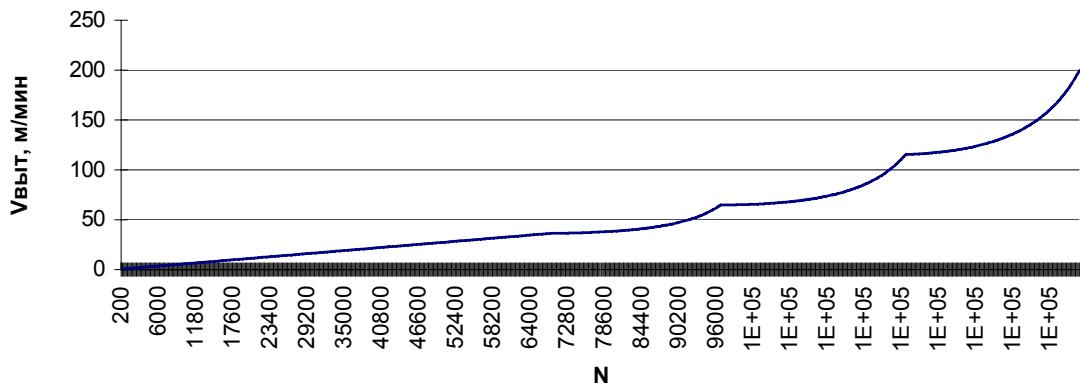


Рис. 1. Работа подпрограммы оптимизации скорости вытягивания волокна.

## Заключение

Практическая реализация методов оптимального проектирования, вошедших в подсистему САПР ТС в виде программно реализованных проектных процедур, показала, что оптимизация проектных решений может широко применяться для систем оптической промышленности. Разработанные методы реализуют:

- методы нахождения глобального экстремума многопараметрических функций;
- комплекс алгоритмов и методов оптимизации многомерных функций качества оптимизирующих глобальный критерий;
- методы свертки локальных критериев оптимизации в глобальный;
- процедура анализа чувствительности для выбора формы представления локального критерия;
- метод последовательного анализа и выбора вариантов;
- теория Байеса для выбора альтернативного варианта, исходя из максимальной ожидаемой выгоды.

Апробация разработанной программной системы была осуществлена на модели технологического процесса вытягивания оптического волокна. В результате была определена оптимальная по производительности работа установки с учетом ограничений, накладываемых на температуру процесса и силу вытягивания. Это позволило на 20% повысить производительность и улучшить качественные показатели получаемого оптического волокна.

## Литература

1. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. М.: Наука, 1980.
2. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А. Оптимизация проектных решений в САПР автоматизированных технологических комплексов. // Научно-технический вестник СПБ ГИТМО (ТУ). Выпуск 6. Информационные вычислительные и управляемые системы. СПБ ГИТМО (ТУ), 2002. С.127–135.
3. Ядыкин И.Б. Принципы построения, архитектура и программные средства автоматизированных систем настройки промышленных регуляторов. // Вычислительная техника. Системы управления. Выпуск 1. 1989. С.25–35.
4. Бондаренко И.Б., Гатчин Ю.А. Оптимизация выбора проектных решений. // Тезисы докладов 30 межвузовского научно-технический семинара с международным участием «Автоматизация проектирования, технология элементов и узлов компьютерных систем», апрель 1998. СПБГИТМО.. С. 7–8.
5. Зойченко Ю.П. Исследование операций. Киев: Высшая школа, 1988.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИЕРАРХИЧЕСКИ ОРГАНИЗОВАННОГО ТЕКСТОВОГО ФОРУМА КАК СРЕДСТВА ONLINE ПОДДЕРЖКИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Н.Ф. Гусарова, М.Н. Коваленко, А.В. Маятин, В.А. Петров, И.В. Шилов

## Компьютерный дискурс как средство реализации научно-технического проектирования

Сегодня научно-техническое проектирование (НТП) все чаще организуется как процесс, распределенный в пространстве и во времени. Формирование процессов распределенного проектирования (цепочек информационного взаимодействия) ускоряет процессы согласования решений на всех стадиях ведения проекта. Существенным моментом распределенного проектирования является организация единого информационного пространства и системы хранения информации. Их использование подразумевает развитую компьютерную инфраструктуру, обуславливает применение новейших компьютерных средств и версий программных продуктов.

Но не менее важную роль в процессе НТП, в особенности на его начальных, концептуальных этапах, играет непосредственное общение между членами коллектива. Именно в процессе такого общения формируются и оттачиваются основные идеи проекта, находящие затем свое воплощение в формальных схемах, чертежах и программных кодах. Поддержать компьютерными технологиями этот, наиболее слабо формализуемый этап научно-технического проектирования – важная задача, во многом определяющая результивность и скорость работы команды проекта.

Основной информационный обмен при НТП происходит посредством речевого общения – дискурса [1] – в его письменной или устной форме. При этом дискурс рассматривается не только как набор изолированных единиц языковой структуры «больше предложения». Согласно [2], любое осмысленное высказывание содержит пропозицию (семантический инвариант) – то, ради чего производится высказывание. В ходе речевой коммуникации участники общения извлекают из памяти, конструируют и обрабатывают изменяющееся множество пропозиций, формирующее основу для интерпретации вновь поступающей информации. Тема дискурса обычно представлена в виде макропропозиции или макроструктуры, в отличие от темы отдельного предложения или высказывания, как правило, представленной именной группой подлежащего.

В работе [3] рассматриваются лингвистические аспекты компьютерного дискурса применительно к компьютерным конференциям (форумам), которые представляют собой дистанционное общение с помощью компьютера по какой-либо проблеме. Отмечается их сходство с научной конференцией в ее неформальной (кулуарной) части, вне жестких рамок протокольных официальных выступлений, т.е. отход от жестко логической структуры диалога [4].

Проведенный обзор позволяет говорить о том, что структурирование дискурса, необходимое для поддержки НТП, лежит на уровне тема-рематического членения и выделения пропозиций, т.е. требует не только грамматического и лингвистического, но и семантического анализа, а также последующего синтеза дискурса.

## Возможности поддержки НТП средствами информационных технологий. Постановка задачи

Современные информационные системы (ИС), связанные с анализом текстовой информации в контексте on-line поддержки НТП, можно условно разделить на три группы.

ИС автоматического анализа текста [5], задачей которых является реструктуризация уже имеющейся в тексте информации, вполне удовлетворительно реализуют лексемный и синтаксический анализ, но, как правило, останавливаются на уровне семантического анализа в рамках относительно небольшого набора предопределенных контекстов. Ни тема-рематического, ни, тем более, пропозиционального структурирования текста эти методы не поддерживают.

В большинстве ИС, ориентированных на работу с текстом, поддерживается режим редактирования. Так, пакет Word компании Microsoft имеет встроенную систему внесения исправлений. Для внесения исправлений может быть выбран любой элемент текстового блока, а выбранные элементы могут пересекаться. При этом внесенные исправления могут быть вложенными. Однако данная система внесения изменений предназначена исключительно для редакторской работы и ускорения создания полностью законченного текстового продукта (заметки, статьи, книги), а наличие возможности вложения исправлений может эту работу затруднить.

Проект Wikipedia [6] дает возможность совершения пользователем определенных действий, таких как создание нового текстового блока, дальнейшая его модификация и слежение за состоянием. Любой желающий может принять участие в проекте, следить за историей изменения состояния какого-либо описания и, по необходимости, возвращать описание на предыдущие этапы. Однако в проекте не реализована возможность создания «временного среза» истории изменений, после которого возврат к предыдущим состояниям, предшествовавшим моменту создания «временного среза», невозможен. Кроме того, проект имеет целью адекватное описание уже существующих фактов и знаний, а для создания новых знаний и принятия решений по ним он непригоден.

Наконец, активно развиваются ИС, созданные для проектирования и сопровождения программных продуктов, типичным примером которых является ИС Jira компании Atlassian [7]. Эта ИС предоставляет возможность координации участников проекта при его проектировании, разработке и дальнейшем сопровождении, а также планирования и распределения задач среди заданного круга участников. Однако ИС Jira не предоставляет возможность непосредственного общения между участника проекта, ведения дискуссии и принятия решений по ее итогам, так как наличие нескольких конкурирующих мнений в системе не предусмотрено, а координация участников проекта ограничена передачей флагов состояний типа «найдена проблема», «решение назначено», «проблема решена», «решение проверено».

Проведенный обзор показывает, что на сегодняшнем уровне развития информационных технологий задачу on-line поддержки НТП целесообразно решать путем построения человека-машинной системы, сочетающей в себе алгоритмы синтаксического анализа как автоматизированную часть и ЛПР как носителя контекста. При этом система поддержки распределенного формирования текстовой информации (далее – система) должна предоставлять следующие возможности:

- многопользовательский доступ;
- публикация текстовых блоков;
- ведение дискуссии;
- подведение итогов;
- автоматическое функционирование.

## **Структура системы распределенного управления текстовой информацией**

Этапы работы системы представлены на рис. 1.

Начальный этап включает в себя публикацию автором исходного текста, автоматическое разбиение текста на структурные составляющие и запись в базу данных. Исходный текст представляется в виде дерева, составными частями которого являются

структурные элементы трех уровней – абзаца (*i*), предложения (*j*) и слова (*k*). При записи в БД каждому элементу присваивается номер вида (*i, j, k*), который не только является уникальным идентификатором данного элемента в пределах текста, но и содержит информацию об исходной структуре текста. Структура предложений сохраняется за счет того, что знаки препинания считаются частью слова, после которых они стоят, а отдельные символические конструкции считаются отдельными словами. Такой прием, с одной стороны, увеличивает избыточность БД, но, с другой стороны, уменьшает количество необходимых таблиц в БД и упрощает реализацию программной части системы.

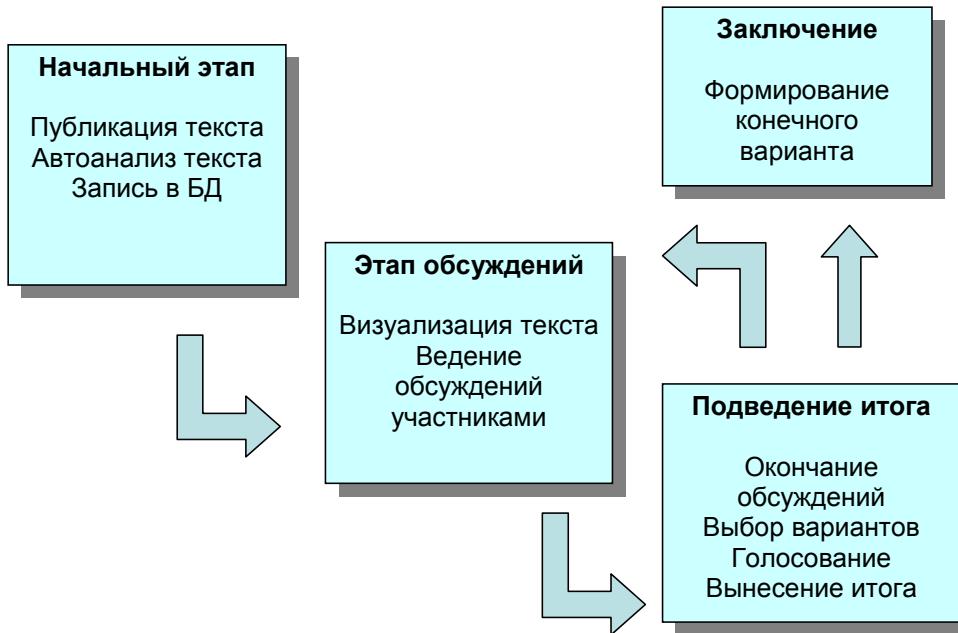


Рис. 1. Этапы работы системы формирования текстовой информации

На этапе обсуждений происходит построение и визуализация исходного текста на сформированной специальным образом веб-странице браузера пользователя (рис. 2). Все действия по составлению предложений и абзацев, а также сворачиванию и развертыванию структурных блоков текста осуществляются на клиентской стороне при помощи скрипта, написанного на языке JavaScript. Пользователь имеет возможность высказать свою точку зрения, если таковая имеется, по любому структурному элементу текста любого уровня, а также продолжить уже начатую дискуссию. Новая дискуссия может быть создана на любой логический элемент текста при условии отсутствия уже начатой или оконченной дискуссии на данный элемент. Время дискуссии ограничено и задается администратором в конфигурационном файле системы.

По истечении времени дискуссии система переходит на этап подведения итога. Итог может быть определен либо участниками дискуссии методом голосования (рис. 3), либо автоматически. В первом случае участники сами выбирают конкурирующие варианты и назначают их на голосование. По завершении времени, отведенного на голосование, вариант, набравший наибольшее количество сторонников, считается итогом дискуссии. Второй случай возможен при наличии предварительно проголосовавших участников: вариант с максимальной оценкой считается итогом, а дискуссия – закрытой без проведения голосования. При наличии нескольких вариантов с минимальной разницей весов среди всех опубликованных пользователями вариантов проводится выбор тех, которые будут приняты к голосованию.

На основе итогов дискуссий автор (или другое ЛПР, например, руководитель проекта) принимает решение об изменении оригинального текста либо о полной его модификации с учетом мнений участвовавших в дискуссии.

**Для системы, использующей devfs(5), вышеуказанные настройки будут сделаны автоматически прозрачно для пользователя.**

До конца дискуссии осталось 14 часов 35 минут.

Автор: asd 20:18 29.12.05  
Для системы, использующей devfs(см man 5 devfs), вышеуказанные настройки будут сделаны автоматически прозрачно для пользователя.  
Мне кажется, написание "devfs(5)" понятно только для тех, кто имеет достаточный опыт работы с этой ОС. Новички скорее всего не догадаются, что имелась ввиду devfs, описание которой надо смотреть в 5й секции man.  
[Я согласен с мнением](#) [Я не согласен с мнением](#) Оценка: 3 (-1/4)

Автор: Зануда 22:15 29.12.05  
Для системы, использующей devfs, вышеуказанные настройки будут сделаны автоматически, прозрачно для пользователя.  
Секцию man вообще не надо указывать, так как в ман-е довольно специфически расписано про devfs, новичок не поймет!  
[Я согласен с мнением](#) [Я не согласен с мнением](#) Оценка: 6 (-2/6)

Рис. 2. Внешний вид страницы открытой дискуссии

**тания одного светодиода АЛ205Г составляет 2,1В, конденсатор С14 в блоке выпрямительный с емкостью 1000мкФ, а резисторы R21 и R19 заменить на аналогичные с мощнос-**

По данному блоку проводится голосование. Выберите один из вариантов, который, как вы считаете, наиболее достоверен и нажмите кнопку "Готово"!  
Голосовать можно только один раз.

До конца голосования осталось 12 часов 8 минут.

Зануда	8
<input checked="" type="radio"/> Так как напряжение питания одного светодиода АЛ205Г составляет 2,1В, конденсатор С14 в блоке выпрямителя нужно заменить на аналогичный с емкостью 500мкФ, а резисторы R21 и R19 заменить на аналогичные с мощностью 1Вт.	
Переяслов С.В.	10

Автор: Зануда 08:43 07.01.06  
Так как напряжение питания одного светодиода АЛ205Г составляет 2,1В, конденсатор С14 в блоке выпрямителя нужно заменить на аналогичный с емкостью 500мкФ, а резисторы R21 и R19 заменить на аналогичные с мощностью 1Вт.  
2,6В у АЛ205Ж, а Uвх у АЛ205Г = 2,1В. А емкость конденсатора надо уменьшить, т.к. емкостное сопротивление будет большое.  
[Оценка: 6 \(-1/7\)](#)

Автор: Переяслов С.В. 19:12 09.01.06  
Так как напряжение питания одного светодиода АЛ205Г составляет 2,1В, конденсатор С14 в блоке выпрямителя нужно заменить на аналогичный с емкостью 1000мкФ, резисторы R21 и R19 заменить на аналогичные с мощностью 1Вт, а резистор R8 исключить из схемы.  
Uвх светодиодов АЛ205Г равно 2,1В (по паспорту). С14 нужно ставить большой емкости, так как амплитуда пульсаций напряжения может достигать больших величин.  
[Оценка: 8 \(-1/9\)](#)

[Готово](#)

[Сбросить](#)

Рис. 3. Общий вид страницы голосования

## Экспериментальные результаты

Разработанная система была использована при выполнении проекта по созданию образовательного Интернет-ресурса. В ходе работы с системой было проведено 14 дискуссий по наиболее спорным вопросам, возникающим при планировании работ, по 10 из них был подведен итог (рис. 4), в том числе по 6 с помощью предварительного голосования. Во всех случаях было сформировано итоговое мнение, удовлетворяющее максимальному количеству участников, которое в дальнейшем рассматривалось всеми разработчиками как внутренний документ.

**Так как напряжение питания одного светодиода АЛ205Г составляет 2,1В, конденсатор С14 в блоке выпрямителя нужно заменить на аналогичный с емкостью 1000мкФ, а резисторы R21 и R19 заменить на аналогичные с мощностью 1Вт.**

По данному блоку была проведена дискуссия и голосование, по завершении которого был подведен итог, и один вариант был признан как наиболее достоверный.

**Так как напряжение питания одного светодиода АЛ205Г составляет 2,1В, конденсатор С14 в блоке выпрямителя нужно заменить на аналогичный с емкостью 1000мкФ, резисторы R21 и R19 заменить на аналогичные с мощностью 1Вт, а резистор R8 исключить из схемы.**

**Автор:** Переяслов С.В  
**Комментарий:** Увх светодиодов АЛ205Г равно 2,1В (по паспорту). С14 нужно ставить большой емкости, так как амплитуда пульсаций напряжения может достигать больших величин.

Рис. 4. Общий вид страницы дискуссии после подведения итога

## Заключение

Построена система поддержки формирования текстовой информации, помогающая коллективу разработчиков сформировать и вербализовать макропропозицию текущего состояния проекта в целом и/или ключевых его вопросов. Система успешно опробована как средство поддержки НТП. Дальнейшее развитие системы связывается с подключением к ней графических модулей, а также с модификациями пользовательского интерфейса.

## Литература

1. Макаров М.Л. Основы теории дискурса. М.: ИТДГК «Гнозис», 2003. 280 с.
2. Фреге Г. Смысл и денотат // Семиотика и информатика. Вып. 8. М., 1977. С. 181–210.
3. Галичкина Е.Н. Специфика компьютерного дискурса на английском и русском языках (на материале жанра компьютерных конференций). Автореф. к. филол. н. Волгоград, 2001. <http://www.vspu.ru/~axiology/index.htm>
4. Федоров Б.И., Джалиашвили З.О. Логика компьютерного диалога. М.: Онега, 1994. 240 с.
5. <http://www.osp.ru/os/2003/12/048.htm>
6. <http://www.wikipedia.org>
7. <http://www.atlassian.com/software/jira/>

# СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЯ ДЛЯ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ «ПОЛИГРАФИЯ» НА ПРИМЕРЕ НАСТОЛЬНОЙ ИЗДАТЕЛЬСКОЙ СИСТЕМЫ «INDESIGN»

А.С. Чернышов, А.В. Маятин, Н.Ф. Гусарова

## Введение

В современных экономических условиях все больше фирм и индивидуальных заказчиков стремятся, используя возможности настольных издательских систем [1, 2], взять максимально возможную часть издательского процесса на себя. Замещение коллектива узких специалистов одним-двумя людьми, имеющими, зачастую, лишь общее представление об издательском процессе и его «подводных камнях» и вынужденными работать в предельно сжатые сроки, не может не оказаться на качестве выпускаемой продукции. С другой стороны, привлечение внешних экспертов, покупка дорогостоящей справочной литературы или специальная подготовка персонала, как правило, оказываются экономически неоправданными.

Одним из возможных путей выхода из сложившейся ситуации является разработка и внедрение в практику небольших издательских подразделений проблемно-ориентированных систем поддержки принятия решений (СППР), которые аккумулируют опыт и знания специалистов и на этой основе позволяют даже сравнительно неопытному пользователю успешно решать встающие перед ним проблемы.

В последние несколько лет содержание понятия «система поддержки принятия решений» (СППР) претерпело изменения. Английский эквивалент этого понятия в современной литературе – Decision Support System (DSS). В период 70-х–90-х чаще применялся другой английский эквивалент – Decision-Making Support System (DMSS). Несмотря на полную идентичность русского названия, речь идет, по сути, о различных сторонах систем одинаковой направленности, а именно: раньше под поддержкой принятия решений понимался инструментарий выработки рекомендаций для лица, принимающего решение (ЛПР), сейчас это понятие, в особенности для больших СППР корпоративного уровня, все чаще означает инструментарий подготовки данных для ЛПР. Однако в настоящей работе, ориентированной на небольшие издательские подразделения, будет использоваться традиционная, первая трактовка термина СППР, которая во многом смыкается с понятием «экспертная система» (ЭС).

Экспертная система [3] – система искусственного интеллекта, включающая знания об определенной слабо структурированной и трудно формализуемой узкой предметной области и способная предлагать и объяснять пользователю разумные решения. Общая структура ЭС представлена на рис. 1.



Рис. 1. Взаимодействие блоков экспертной системы

Как показывает проведенный авторами обзор, на отечественном рынке не представлены СППР, решающие проблемы полиграфии. В настоящей статье описан опыт разработки такой СППР, ориентированной на работу в пакете Adobe InDesign.

## Источники и пути решения проблем полиграфии

При подготовке издания к печати возникают ряд проблем, которые становятся главными источниками ошибок и брака в печатной продукции:

- яркость полиграфического продукта меньше, чем изображения на мониторе;
- связь между источником ошибки и ее видимым проявлением в тираже, как правило, является сложной, опосредованной и проявляется только спустя несколько технологических операций;
- подавляющее большинство технологических операций процесса печати являются необратимыми.

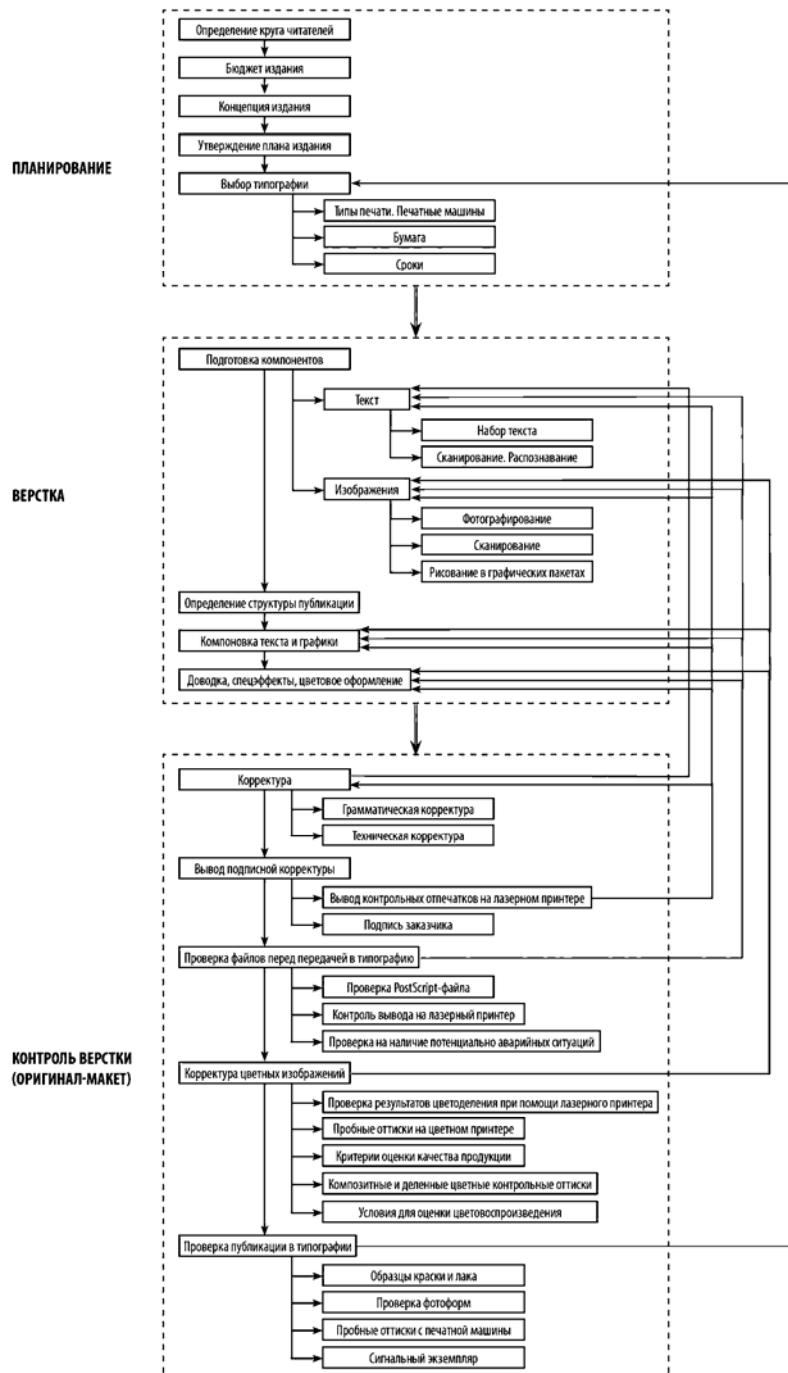


Рис.1. Схема процесса подготовки полиграфического продукта

На рис. 2 приведена построенная авторами проблемно-ориентированная схема процесса подготовки полиграфического издания и выделены признаки ошибок или некорректной работы оборудования, которые возможно распознать в ходе или по окончании каждой технологической операции.

На мониторе в файле верстки можно увидеть и непосредственно устранить ошибки корректуры и ошибки позиционирования элементов верстки. Все они имеют явные и однозначные причины неполиграфического происхождения, и применение СППР для их идентификации и устранения не требуется.

После преобразования готового файла в PostScript возможность какого-либо визуального контроля этого преобразования отсутствует. Преобразованный файл непосредственно передается в типографию. Для организации промежуточного контроля можно выполнить преобразование из PostScript в файл .pdf, т.е. получить дистиллированный pdf-файл. На этой стадии можно идентифицировать некоторые проблемы, которые возникнут в будущем тираже из-за неудачного подбора шрифтов, например, замена требуемого шрифта на Courier, неправильный кернинг (пара букв при векторизации шрифта «наезжает» друг на друга), заплыивание очка литеры и т.д. Каждая из этих проблем, в свою очередь, не имеет однозначной причины. Например, заплыивание очка литеры может возникнуть из-за того, что диаметр очка меньше разрешения, поддерживаемого фотонаборным автоматом, или из-за того, что один из применяемых программных пакетов не поддерживает операцию «исключающего или», необходимую для формирования литеры «О» из двух «половинок».

Еще одна точка промежуточного контроля – аналоговая цветопроба, состоящая в выводе набор из 4 цветоделенных пленок, с которых на специальном аппарате печатается один экземпляр издания. Операция является достаточно дорогостоящей, но весьма информативной в плане выявления ошибок будущего тиража. Только здесь возникает возможность идентифицировать ошибки раstra, в том числе:

- залипание (глянцевый эффект на больших плоскостях однородного цвета);
- муары (регулярные структуры на изображении, возникающие из-за биения раstra офсета и раstra, присущего в исходном изображении, например, при работе с форматом .jpeg, со сканированным типографским изображением и т.д.);
- ошибки настройки или отсутствия оверпринта (в особенности для шрифтов небольшого кегля).

Наконец, на стадии тиража возможна идентификация ошибок, связанных со свойствами бумаги, используемой при печати, в том числе ее светоотражением, промоканием, направлением волокон целлюлозы.

## **Реализация СППР для решения проблем полиграфии**

Проведенный обзор и анализ позволил провести концептуальное проектирование и программную реализацию СППР, ориентируемой на решение проблем оперативной полиграфии на базе настольных издательских систем.

База знаний СППР строится на базе схемы рис. 2 и концептуально представляется в виде семантической сети – графа, вершины которого – наводящие вопросы, которые соединяются ребрами, исходя из выбранного варианта ответа. Опыт извлечения знаний из экспертов-полиграфистов [4] позволяет утверждать, что этот граф можно разложить на набор подграфов, представимых в виде деревьев «вопрос–ответ» [5] и ориентированных на решение отдельных групп проблем, например, проблемы с текстом, с импортированными изображениями, с векторной графикой и т.д.

Таким образом, работа системы строится на взаимодействии «вопрос–ответ», которое реализуется в виде дерева связей. Структура дерева «вопросов–ответов» создает-

ся экспертным путем и хранится в виде XML-файла. Пример структуры дерева для решения проблем с текстом представлен на рис. 3.

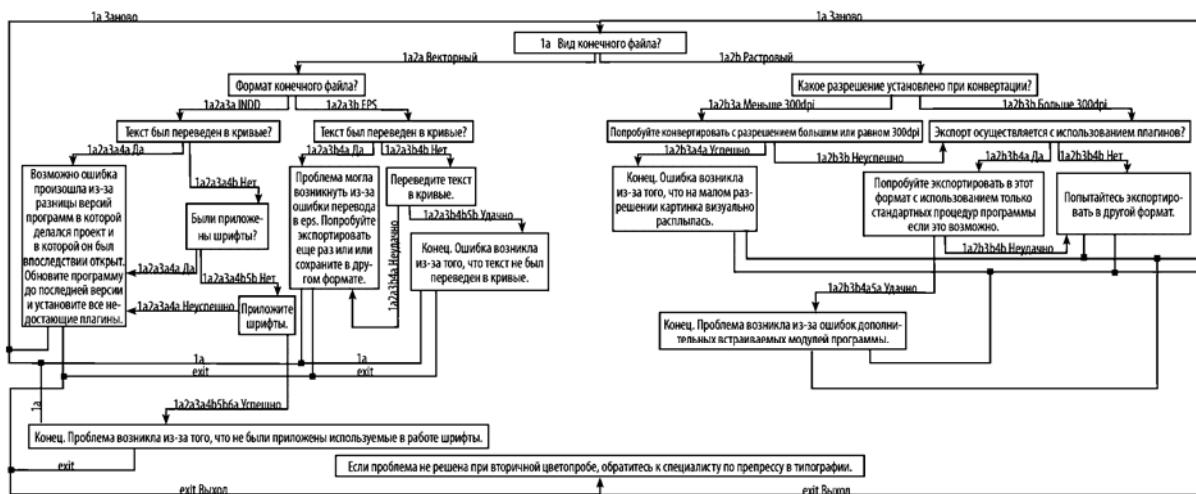


Рис.3. Дерево связей «вопрос-ответ» для решения проблем с текстом

Для представления внутренней структуры документа используются DOM-интерфейсы [6].

Пользователь взаимодействует с системой через PHP-интерфейс, который обращается к нужному XML-файлу в зависимости от выбора проблемы пользователем. Далее в режиме «вопрос-ответ» пользователь обходит граф XML-файла, представленный PHP-скриптом, который реализует разбор, анализ и работу с деревом связей. Сначала разбирается весь XML-документ, затем пользователю выводится первый вопрос, и по результатам ответа на него начинается ветвление в соответствующем направлении. Последний для конкретной ветки блок выдает заключение о причине возникновения проблемы и, при необходимости, варианты ее решения.

Каждый шаг работы системы сопровождается пояснительными иллюстрациями, помогающими пользователю понять смысл вопроса и правильно выбрать вариант ответа.

В издательском процессе СППР ставится до момента передачи макета в типографию или до начала вывода контрольного тиража.

Спроектированная СППР программно реализована в сети Интернет на условиях свободного доступа по адресу [www.chasdesign.h15.ru/assistant.php](http://www.chasdesign.h15.ru/assistant.php). Дальнейшее развитие системы связывается с расширением номенклатуры деревьев решений.

## Литература

1. Малышкин Е.В., Мильчин А.Э., Павлов А.А., Шадрин А.Е. Настольная книга издателя. / Справочное пособие. М.: АСТ, 2004. 840 с.
  2. Настольные издательские системы. / <http://www.rudtp.ru>
  3. Экспертные системы / <http://www.cs.karelia.ru/>
  4. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2000. 384 с.
  5. Структуры данных. Деревья /<http://ermak.cs.nstu.ru/>
  6. Ваша библиотека для дизайнеров и веб-мастеров. Что такое DOM. /<http://mylib.kiev.ua/>

# КАТАЛОГИЗАЦИЯ СЛАБО СТРУКТУРИРОВАННЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ ОБЪЕКТОВ С ПОДДЕРЖКОЙ МНОГОКОНТЕКСТНОГО ПОИСКА

Н.Ф. Гусарова, А.В. Маятин, И.В. Шилов

В настоящее время мультимедиа-технологии являются бурно развивающейся областью информационных технологий. Анализ объектов мультимедиа говорит о том, что большинство из них не обладает достаточным набором признаков, позволяющим провести их структуризацию. Как правило, можно выделить только два уровня элементов их структуры – уровень программного представления и уровень объекта целиком. Таким образом, их можно назвать слабо структурированными. Это затрудняет возможность каталогизации и, как следствие, поиск информации, представленной внутри таких объектов. Примером является звуковой файл, наглядно демонстрирующий сложность разметки и именования его участков, хотя для пользователя они могут представлять самостоятельный интерес в рамках того или иного критерия структурирования. (Под именованием в работе понимается сопоставление фрагменту, ограниченному метками, текстовой строки, отражающей семантику, накладываемую пользователем на этот фрагмент)

Все это делает актуальным исследование проблемы каталогизации слабо структурированных информационных объектов.

Способы каталогизации и обеспечения поиска в массивах аудиоинформации на сегодня достаточно ограничены. Так, аудиоредактор Cool Edit Pro (Adobe Audition) [1] позволяет выделять в аудиофайле интересующие пользователя фрагменты, однако их семантическое именование возможно только путем сохранения в отдельный файл, что не позволяет организовать контекстный поиск по исходному файлу. Аудиоплейер WinAmp [2, 3] позволяет создавать иерархические структуры из аудиофайлов, но гранулированность индексации ограничена только файлом целиком.

Предложенные к настоящему времени способы введения запросов на поиск в массивах аудиоинформации сегодня основываются преимущественно на непосредственном задании искомого музыкального фрагмента – с помощью музыкальной клавиатуры (query-by-example) [4], микрофона (query-by-singing) [5] или специализированной нотной записи (query-by-note) [6]. Предложены и более упрощенные варианты: например, в [7] предложен проект создания музыкально-поискового сервиса, в котором основным поисковым параметром является ритм, а основным способом организации запроса – выступление ритма, например, на клавиатуре. Эти подходы плохо соотносятся с организацией большинства поисковых серверов и не обеспечивают возможности семантического именования интересующих фрагментов.

Основной подход к решению обозначенной проблемы видится в проектировании механизмов, позволяющих осуществлять разметку таких объектов пользователем с последующим присвоением фрагментам семантически значимого именования [8]. Получающиеся именованные текстом структуры в дальнейшем могут послужить базисом для организации поиска фрагментов мультимедиа объектов по различным критериям, задаваемым пользователем в текстовом виде.

Процесс работы пользователя со слабо структурированным информационным объектом состоит из двух этапов – этапа формирования семантических структур и этапа поиска информации по этим структурам (рис. 1). При воспроизведении какого-либо мультимедиа файла пользователю дается возможность выделения из потока воспроизведения интересующего его фрагмента и его именования. Информация о границах объекта и соотнесенной с ним текстовой строкой сохраняется в иерархической текстовой структуре.

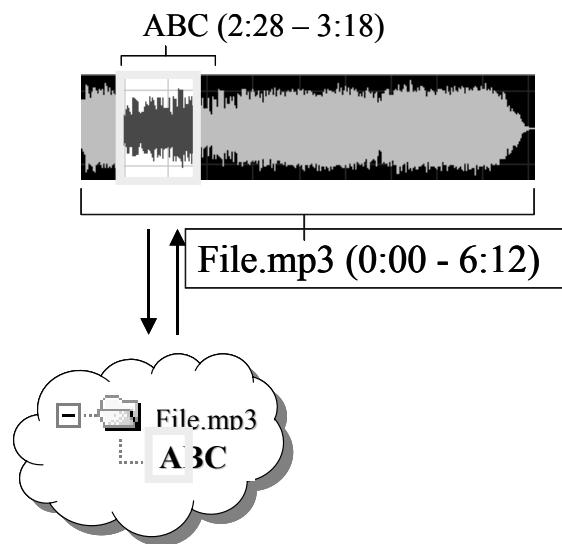


Рис. 1. Процесс именования и поиска аудиофрагмента по семантической метке

При поиске фрагмента пользователь формирует текстовый поисковый запрос. В случае вхождения этого запроса в строки, соотнесенные на предыдущем этапе с фрагментами файлов, отыскиваются границы этих фрагментов и даётся возможность осуществить их воспроизведение.

Описанный механизм программно реализован на ОС FreeBSD. Это дало возможность органичными для POSIX-платформ средствами реализовать программный инструментарий для исследования, а также использовать сформированное вокруг нее открытое сообщество как среду для организации фокус-групп. В качестве языка разработки использован TCL, архитектурно согласованный с платформой и обеспечивающий наглядность исходного кода.

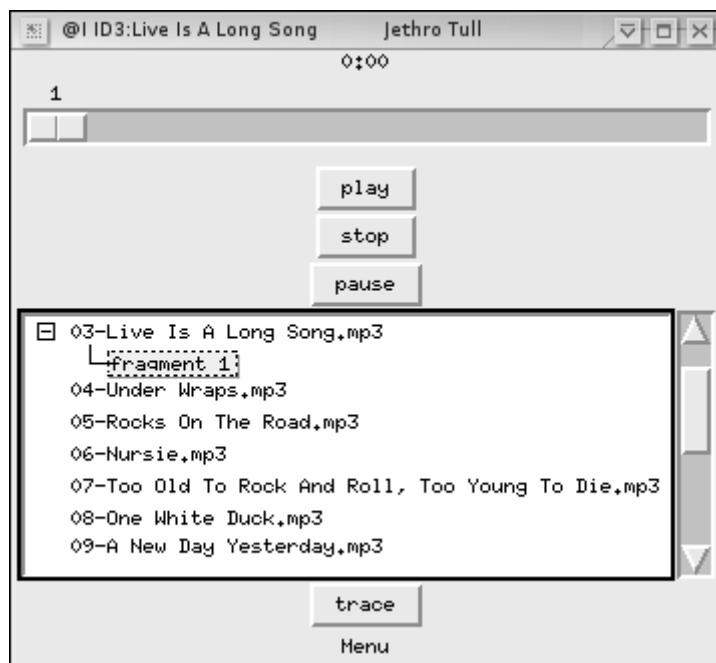


Рис. 2. Интерфейс пользователя: новый фрагмент создан и и готов к воспроизведению

В соответствии с принятой в стандарте POSIX концепции UNIX WAY разрабатываемая система строится из двух независимых компонент, каждый из которых представляет собой два параллельных процесса, взаимодействующих через канал. За основу

был взят консольный, т.е. не имеющий оконного интерфейса, проигрыватель mp3 mpg321. Разработанный TCL-скрипт взаимодействует с ним посредством программного канала. Информация, которую необходимо собрать, включает в себя начало фрагмента, конец фрагмента и его текстовое описание.

Во время воспроизведения по первому нажатию правой клавишей мыши на ползунке воспроизведения запоминается начало фрагмента. Затем, когда необходимый интервал подходит к концу, пользователь повторным нажатием правой клавиши мыши обозначает конец фрагмента. Сразу после второго нажатия на ползунке появляется окно, запрашивающее текстовое описание фрагмента (рис. 2). По нажатию кнопки "Ok" в этом окне происходит добавление фрагмента.

Созданная система ориентирована на широкий круг пользователей операционных систем семейства UNIX. Система является свободным проектом на условиях GPL, исходный код предоставлен в общий доступ. Система тестиировалась членами сообщества OSF, от которых получено 13 положительных отзывов и предложений об ее усовершенствовании.

В дальнейшем предполагается развить реализованный в рамках системы подход на другие области мультимедиа.

## Литература

1. Петелин Р.Ю., Петелин Ю.В. Adobe Audition. Обработка звука для цифрового видео СПб: "БХВ-СПб", 2004. 400 с.
2. Золотов Е. Музыка звучит так // Компьютерра. 2003. №52.
3. Портал WinAmp Russia / [winamp.hot-tur.ru](http://winamp.hot-tur.ru)
4. Herb H., Chen L. A query by example music retrieval algorithm // Proceedings of the European Workshop on Image Analysing for Multimedia Interactive Services, 2003, p.122–128.
5. Haus G., Pollastri E. An audio front-end for query-by-humming systems. // Proceedings of ISMIR. 2001. P. 65–72.
6. Pickens J. A comparison of language modeling and probabilistic text information retrieval approaches to monophonic user retrieval // Proceedings of ISMIR. 2000.
7. Бузикашвили Н. Общедоступный сервис поиска музыки по ритмическому сходству. / [http://www.rcdl2005.uniyar.ac.ru/RCDL2005/papers/sek10\\_2\\_paper.pdf](http://www.rcdl2005.uniyar.ac.ru/RCDL2005/papers/sek10_2_paper.pdf).
8. Гусарова Н.Ф., Маятин А.В., Петров В.А., Шилов И.В. Проектирование пользовательского интерфейса ОС с функцией поддержки ассоциативных связей пользователя. // Труды Международной конференции по системам искусственного интеллекта AIS'2005. Дивноморское, 3 – 10 сентября 2005 г.

## ПРИМЕНЕНИЕ UP ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОДСИСТЕМ ТПП

Д.Д. Куликов

В работе рассмотрена методология автоматизации технологической подготовки на базе «унифицированного процесса» (Unified Process – UP). Проектирование подсистем ТПП представлено как итеративный процесс, имеющий свои фазы и вехи. Для каждой фазы рассмотрены основные рабочие процессы, на основе которых сформулирована стратегия автоматизации ТПП.

### Введение

Совершенствование технологической подготовки производства (ТПП) – это сложный и продолжительный во времени процесс. Поэтому необходимо иметь эффективную методику и инструментальные средства для разработки автоматизированных подсистем ТПП. Следовательно, имеет смысл говорить о некоторой метасистеме как надстройке над АСТПП, с помощью которой выполняется проектирование самой АСТПП. Такую метасистему назовем «Системой проектирования технологической подготовки производства» (СП ТПП). Так как процесс совершенствования ТПП носит итерационный характер и СП ТПП будет неоднократно использоваться, то целесообразно включить ее в состав АСТПП как подсистему. Необходимость и возможность такого подхода показана в работе [2]. В этой работе выделены целевые и собственные функции АСТПП, и в состав ее собственных функций включена функция «Проектирование и настройка программных систем». СП ТПП создается на основе использования концепций CALS, должна быть интегрирована с другими подсистемами АСТПП и функционировать под управлением PDM-системы в рамках единого информационного пространства [1].

С помощью СП ТПП реализуется заданная стратегия развития АСТПП. Стратегия развития АСТПП представляет собой способ организации жизненного цикла подсистем ТПП. От выбранной стратегии во многом зависит эффективность функционирования подсистем ТПП. В настоящее время при разработке сложных программных систем наибольшее применение получают подходы, основанные на объектно-ориентированном анализе и проектировании программных комплексов. Эти подходы пришли взамен каскадных и спиральных моделей проектирования программных систем. Одной из наиболее перспективных в настоящее время считается методология, основанная на использовании «унифицированного процесса» (Unified Process – UP). Под UP понимается формализованная технология разработки сложных программных систем, использующая универсальный язык моделирования UML [3]. Наиболее законченный вид эта методология нашла в унифицированном процессе компании Rational Software Corporation (Rational Unified Process – RUP), важной особенностью которого является, помимо большого набора справочных пособий и шаблонов для основных артефактов, наличие инструментария (Rational Suite) для эффективного проектирования сложных программных систем.

На наш взгляд, стратегия, основанная на UP, в наибольшей степени соответствует предлагаемой концепции создания АСТПП, так как позволяет достаточно быстро проектировать работоспособные варианты подсистем ТПП и запускать их в эксплуатацию. Поэтому в данной работе рассмотрена методика применения UP для разработки подсистем ТПП.

## Содержание

Унифицированный процесс является развитием спиральной модели Боэма, и разработка программной системы в этой идеологии организуется в виде эволюционно-инкрементного жизненного цикла (рис. 1). Эволюционная составляющая цикла основывается на доопределении требований в ходе проектирования, инкрементная составляющая – на планомерном приращении реализации требований или, другими словами, на пошаговом наращивании возможностей (incremental) системы.

Как показано на рис.1, при выполнении итерации выполняется управление рисками. Наиболее важными рисками являются следующие:

- несвоевременное выполнение этапа работ;
- превышение бюджета, отведенного на этап;
- результаты выполнения этапа не отвечают требованиям заинтересованных сторон.



Рис.1. Итеративный и инкрементный процесс разработки подсистем ТПП

После выделения самых опасных рисков организуется планирование и выполнение действий по созданию системы, которые закреплены за данной итерацией. По завершению итерации производится оценка результатов выполнения этой итерации. В случае неудовлетворительных результатов пересматривается план проекта, и итерация повторяется. Таким образом, работа с рисками – выделение самых опасных рисков, определение способов их устранения, регулярный пересмотр рисков – является важной составной частью UP, необходимой для успешного завершения проекта.

В соответствии с этой методологией создание автоматизированной подсистемы ТПП рассматривается как процесс, жизненный цикл которого проходит определенные фазы, причем в каждой фазе возможны итерации, связанные с переходом фазы в новое состояние (рис. 2). Результатом итерации является инкремент, который представляет собой версию системы с дополнительными или усовершенствованными функциональными возможностями по сравнению с предыдущей версией. В свою очередь, каждая фаза завершается вехой, отражающей результаты выполнения фазы. Вехи дают руководителям возможность провести анализ и принять нужные решения перед тем, как работа перейдет на следующую фазу. В частности, отслеживая время и усилия, затраченные на очередную фазу, руководство корректирует планы и ресурсы, необходимые для выполнения следующих фаз.

Важной особенностью процесса проектирования АСТПП является то обстоятельство, что ввиду сложности подсистем ТПП в начале их создания известны не все требования, поэтому их дополнение и изменение осуществляется на всех итерациях жизненного цикла. Между фазами и этапами ТПП может быть проведено следующее

соответствие. Фазе «Исследования» соответствуют этапы предпроектного анализа ТПП и разработки технического задания, фазе «Уточнение» – этапы технического проекта, фазе «Построение» – этап рабочего проекта, а фазе «Развертывание» – этапы, связанные с внедрением и эксплуатацией подсистем ТПП.

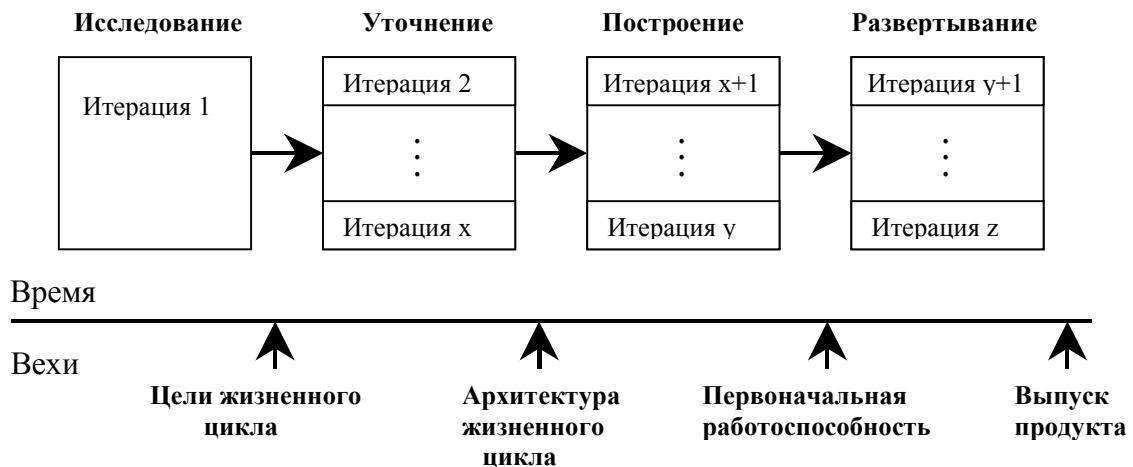


Рис. 2. Фазы, итерации и вехи жизненного цикла подсистем ТПП

В структуре UP выделяют два измерения: *горизонтальная ось* представляет время и демонстрирует прохождение по фазам жизненного цикла проектов подсистем ТПП; *вертикальная ось* представляет рабочие потоки, которые являются логическими группировками действий.

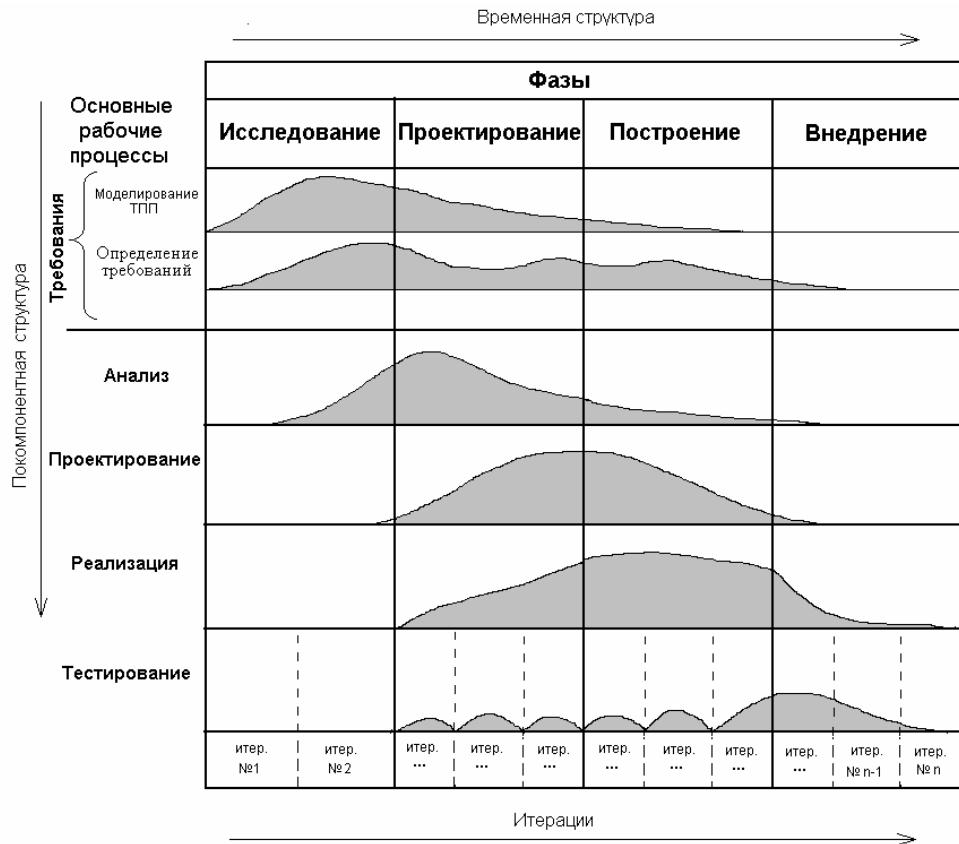


Рис. 3. Структура унифицированного процесса в двух измерениях

Как видно из рис. 3, первое измерение представляет динамическую сторону процесса, выражаемую через фазы, итерации и вехи. Второе измерение представляет статическую сторону процесса – его описание через компоненты процесса: управление требованиями; анализ; проектирование; реализация; тестирование.

Кривые приближенно изображают (их не следует воспринимать слишком буквально) объемы рабочих процессов, выполняемых в каждой из фаз. Каждая фаза, как было показано выше, дополнительно разделяется на итерации (мини-проекты). Таким образом, процесс анализа и проектирования можно представить как поуровневый спуск от наиболее общих моделей и представлений концептуального уровня к более частным и детальным представлениям логического и физического уровня. При этом на каждой итерации модели последовательно дополняются все большим количеством деталей, что позволяет им более адекватно отражать различные аспекты конкретной реализации подсистемы ТПП.

Одним из принципов построения моделей сложных систем является принцип многомодельности: никакая единственная модель не может с достаточной степенью адекватности описывать различные аспекты сложной системы. Это означает, что достаточно полная модель сложной системы допускает некоторое число взаимосвязанных представлений (см. рис. 4).

Указанные представления фиксируются с помощью комплекса моделей, выражаемых с помощью комплекса диаграмм UML. В этот комплекс входят диаграммы прецедентов, деятельности, последовательностей, вариантов использования, классов, состояний, коопераций, компонентов, развертывания.



Рис. 4. Общая схема взаимосвязей моделей и представлений в ТПП

Заложенные в языке UML потенциальные возможности могут быть использованы не только для объектно-ориентированного моделирования систем, но и для представления знаний в интеллектуальных системах, которыми, по существу, станут перспективные сложные подсистемы ТПП [4].

Рассмотрим в первом приближении применение UP при проектировании какой-либо подсистемы ТПП. Проектирование начинается с фазы «Исследование». В этой фазе в первую очередь выполняется процесс «Требования». Целью выполнения этого процесса является анализ предметной области и выявление требований к проектируемой

подсистеме ТПП. Этому процессу в стандартах ЕСТПП соответствует стадия предпроектного анализа ТПП.

Необходимость предпроектного анализа вызвана тем обстоятельством, что технологическая подготовка изделий на каждом предприятии имеет свои особенности. Поэтому подсистемы ТПП каждого предприятия являются уникальными, хотя и реализованы на базе общих принципов, зафиксированных в соответствующих стандартах ЕСТПП, ЕСКД, ЕСТД и т. д.

Применительно к ТПП процесс предметную область целесообразно моделировать в виде диаграмм IDEF0. Выбор стандарта IDEF0 вызван тем, что методология SADT,ложенная в основу IDEF0, получила широкое применение в мире для функционального моделирования бизнес-процессов и поэтому была закреплена в ряде международных и государственных стандартов. В качестве инструментальных средств для моделирования ТПП может быть использован пакет Platinum BPwin 4.0 фирмы Computer Associate или Design/IDEF фирмы Meta Software. В первой части «Анализ ТПП» рабочей операции «Требования» (фаза «Исследование») в первую очередь составляются диаграммы IDEF0.

В диаграмме первого уровня (контекстной диаграммы IDEF0) фиксируются все подсистемы ТПП. В соответствии с поставленной целью на диаграммах следующих уровней фиксируются лишь функциональные блоки, связанные с проектированием и утверждением комплекта технологических документов. Важно правильно выбрать глубину и ширину детализации. Уровень детализации должен быть выдержан ровно настолько, насколько это необходимо для того, чтобы разобраться в процессе получения технологических документов. Документирование ситуации, сложившейся к определенному моменту (модели «как есть» – «as is») необходимо для создания на следующих фазах моделей «как должно быть» (модели «to be»).

При выполнении бизнес-моделирования в первую очередь, как было показано выше, анализируются функции, задачи и процедуры ТПП и создаются диаграммы предшественников и диаграммы деятельности. На базе этих диаграмм проектируется концептуальная модель предметной области существующей ТПП.

На основе анализа выполняется вторая часть – «Определение требований» – рабочей операции «Требования». В этой части необходимыми являются следующие виды деятельности.

- Сформулировать область действия проекта, т.е. зафиксировать среду, важнейшие требования и ограничения с тем, чтобы к завершению проекта можно было получить критерии приемлемости.
- Спланировать и подготовить бизнес-план, а также оценить альтернативы для управления рисками, кадрового обеспечения, плана проекта и выбора компромисса между ценой, графиком работ и рентабельностью.
- Спроектировать возможную архитектуру, оценить компромиссы в проекте и определиться, какие компоненты будут создаваться, какие – покупаться, а какие – использоваться повторно, с тем, чтобы оценить стоимость, ресурсы и график работ.

Главным результатом этой части является техническое задание на выполнение проекта. В техническом задании фиксируется первая из основных вех – веха цели жизненного цикла. Необходимо отметить, что приведенная в ТЗ оценка ресурсов, требуемых для реализации всего проекта, должна рассматриваться как весьма приблизительная, «интуитивная». Эта оценка будет корректироваться при последующих фазах и итерациях, и с каждой такой итерацией она будет точнее.

Следующая фаза «Уточнение» примерно соответствует разработке технического проекта по стандартам ЕСТПП. Целью фазы является установление архитектуры создаваемой подсистемы, разработка плана проекта и исключение из проекта элементов наибольшего риска. Для достижения этого требуется осмотреть систему «на километр в

ширину, на сантиметр в глубину». Данная фаза является самой критичной фазой проекта. После ее завершения наступает важнейший момент принятия решения: стоит ли реализовывать фазы построения и развертывания. Фаза соответствует переходу от мобильной, гибкой работы с низким уровнем риска к более дорогой и рискованной работе.

В фазе «Уточнение» за одну или несколько итераций (это зависит от области действия, размера, риска и новизны проекта) создается выполнимый архитектурный прототип подсистемы ТПП. Эта работа, как минимум, должна дать критические прецеденты, определенные в фазе исследования; обычно они показывают основные технические риски проекта. В фазе «Уточнение» необходимыми являются следующие виды деятельности:

- тщательная разработка видения и установление четкого понимания наиболее критичных прецедентов, направляющих архитектурные и проектные решения;
- тщательная разработка процесса, инфраструктуры и среды разработки, а также согласование процесса, инструментальных средств и автоматизированной поддержки;
- разработка архитектуры и выбор компонентов; оценка потенциальных компонентов для последующего определения стоимости и графика работ фазы «Построение».

Фаза «Уточнение» плана заканчивается второй важной вехой архитектуры жизненного цикла. В этот момент исследуется область действия системы, конкретизируются цели, а также осуществляется выбор архитектуры и способов разрешения важнейших рисков.

Во время фазы «Построение» все оставшиеся компоненты и функции приложений разрабатываются и интегрируются в окончательный продукт; кроме того, все функции проходят тщательное тестирование. На выходе этой фазы получаем продукт, готовый к передаче конечному пользователю. Он включает, как минимум, следующее: программный продукт, реализуемый на соответствующей платформе; комплект эксплуатационной документации; описание текущей версии.

Фаза построения завершается третьей основной вехой проекта – вехой первоначальной работоспособности. В этот момент принимается решение, готовы ли к активной работе программное обеспечение, узлы и пользователи и не подвергнуты ли они высоким рискам. Такая версия продукта обычно называется *бета-версией*. Если проект не сможет пройти эту веху, то фазу развертывания, вероятно, придется отсрочить на одну версию.

Целью фазы «Развертывание» является передача программного продукта подразделениям ТПП и начальная эксплуатация подсистемы (этап опытно-промышленной эксплуатации подсистемы по стандартам ЕСТПП). Данная фаза включает следующее.

- бета-тестирование, позволяющее убедиться, что новая система соответствует ожиданиям пользователя;
- параллельное функционирование с существующей системой, которую должна заменить разрабатываемая;
- перекодирование эксплуатационных баз данных;
- подготовка пользователей и персонала поддержки.

В фазе развертывания акцент делается на видах деятельности, необходимых для передачи программного обеспечения в руки пользователей. Как правило, эта фаза включает несколько итераций, в том числе выпуск бета-версий, а также корректирующих и модернизирующих версий. Эта конечная точка жизненного цикла может совпадать с начальной точкой следующего цикла, вызывая «рождение» нового поколения или версии подсистемы ТПП. Фаза «Развертывание» завершается четвертой важнейшей вехой проекта – вехой выпуска продукта. В этот момент принимается решение, достигнуты ли поставленные цели и стоит ли начинать еще один цикл разработки.

Таким образом, рассмотренная методология разработки программных систем позволяет осуществить современный подход к созданию подсистем ТПП и обеспечить необходимое качество программных продуктов.

Возможны два принципиально различных подхода к автоматизации ТПП и соответствующие им стратегии автоматизации ТПП. Первый подход, который можно назвать «сначала вширь, а затем вглубь», основан на автоматизации максимально возможного количества рабочих мест в ТПП при минимальном уровне автоматизации решаемых на них задач. Под минимальным уровнем понимается решения задач с использованием текстовых и графических редакторов, с последующей записью полученных документов в электронный архив.

Второй подход, который можно назвать «сначала вглубь, а затем вширь» основан на высокой автоматизации отдельных подсистем ТПП, причем автоматизация осуществляется последовательно – подсистема за подсистемой.

Первый подход, на наш взгляд, является предпочтительней, так как позволяет:

- организовать единое информационное пространство;
- на базе ЕИП организовать интеграцию между подсистемами ТПП, а также между подсистемами ТПП и АСУ предприятия;
- осуществлять эффективное управление ТПП на основе использования PDM-системы;
- организовать автоматизированный контроль процесса подготовки изделий к производству на основе технологии «workflow».

## **Заключение**

Стратегию автоматизации ТПП целесообразно организовать на основе «сначала вширь, а затем вглубь» с использованием инструментальных средств СП ТПП. Такая стратегия даст возможность создать единое информационное пространство и реализовать функционирование подсистем ТПП под управлением PDM-системы при минимальном начальном уровне автоматизации рабочих мест.

## **Литература**

1. Куликов Д. Д., Яблочников Е.И. Методологические аспекты автоматизации технологической подготовки производства. // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2004. №4. С. 35–42.
2. Технологическая подготовка гибких производственных систем. / С.П. Митрофанов, Д.Д. Куликов, О.Н. Миляев, Б.С. Падун. Л.: Машиностроение: Ленингр. отд-ние, 1987. 352 с.
3. Буч Г., Рамбо Дж., Джекобсон А. Язык UML. Руководство пользователя. Пер. с англ. М.: ДМК, 2000. 432 с.
4. Яблочников Е.И. Построение функциональных моделей процессов технологической подготовки производства с применением диаграмм UML // Инновации в науке, образовании и производстве. Труды СПбГПУ. № 488. СПб: Изд-во СПбГПУ, 2004. С. 221–227.

# ОРГАНИЗАЦИЯ УДАЛЕННЫХ БАЗ ДАННЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

## А.О.Дергунов

В статье излагаются особенности организации удаленных баз данных технологического назначения. Рассматриваются возможные пути их реализации. Приводится конкретный пример реализации базы данных технологического назначения.

### Введение

Актуальность данной тематики обусловлена ростом масштабов работ по интенсификации и компьютеризации технологических процессов. Создание единой системы сбора и обработки данных для АСТПП должно существенно повысить качество и эффективность всех звеньев производства.

Одним из ключевых факторов, определяющих мощность и конкурентоспособность информационной системы, является правильный выбор СУБД. В настоящее время все большее число создаваемых информационных систем основывается на архитектуре «клиент-сервер». Применительно к системам баз данных архитектура «клиент-сервер» интересна и актуальна главным образом потому, что обеспечивает простое и относительно дешевое решение проблемы коллективного доступа к базам данных в локальной/глобальной сети [1].

### Основные особенности баз данных технологического назначения

Основными источниками данных технологического назначения являются различные таблицы из справочников, которые отличаются относительно малым набором строк и довольно разнообразной структурой. Это обстоятельство существенно усложняет представление, поиск и обработку данных технологического назначения. Предыдущие попытки в основном своем сводились к простому воспроизведению этих таблиц при помощи dbf-файлов. Такой подход, к сожалению, не обеспечивает должной гибкости, вынуждает вводить чисто логические связи, что существенно затрудняет поддержку целостности базы данных. Например, чтобы добавить новый набор данных, необходимо создавать новый dbf-файл, при изменении же составляющих набора необходимо изменять и структуру таблиц.

В связи с этим видится целесообразным выделить классы, состоящие из близких по сути объектов, а объекты с одинаковыми признаками, в свою очередь, имеет смысл объединить в группы (рис. 1)

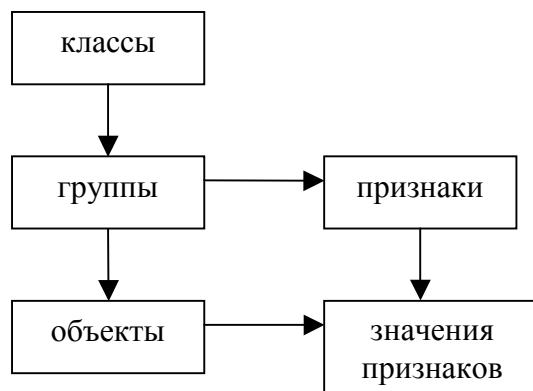


Рис. 2. Структура базы технологического назначения

По сути, группа при таком подходе логически будет представлять собой таблицу, а объект – запись в таблице. Вместе с тем, за счет физического отделения признаков в отдельный набор данных резко увеличивается адаптивность структуры данных. Помимо этого, при таком подходе за счет стандартных средств СУБД становится возможным поддерживать целостность данных.

## Выбор средств реализации

Подавляющее большинство баз данных реализуется в настоящее время под управлением реляционных СУБД, таких как MS SQL Server, InterBase/Firebird, MySQL, PostgreSQL, Oracle, DB2.

Среди данных СУБД все более популярность у разработчиков приобретает MS SQL Server. Это связано с простотой использования, сбалансированностью его возможностей, нетребовательности к ресурсам. Следует также отметить, что он прекрасно взаимодействует с основными продуктами для разработчиков WIN-приложений (Visual FoxPro, Visual Studio.NET, MS Office и пр.). В силу этих причин при реализации базы данных конечный выбор пал именно на SQL Server2000.

Для доступа к базе данных в настоящее время чаще всего используются GUI-клиент («толстый») или web-клиент («тонкий»).

«Тонкий» клиент позволяют работать с базой данных без установки специального программного обеспечения, требует лишь наличия браузера и платформонезависим. Вместе с тем при использовании «тонкого клиента» на сервере происходит формирование запроса к базе данных, выполнение запроса и обработка результата его работы. На клиентские машины посыпается только конечный результат работы в виде сгенерированных сервером HTML-страничек. Однако, например, если 100 клиентов одновременно обращаются к сценарию или программе на сервере, в памяти сервера открывается 100 экземпляров этого сценария или программы [4]. Таким образом, использование данного подхода максимально нагружает сервер работой, при этом разгружая клиентские машины. «Толстый» клиент, в свою очередь, напротив, выполняет большинство вычислений на клиентской машине, тем самым разгружая сервер. При этом «толстый» клиент требует непосредственной установки клиентской части на компьютер пользователя и, как правило, является платформозависимым.

В связи с этим видится целесообразным доступ к базе данных осуществлять, используя преимущества обеих технологий. С этой целью приложения для создания «тонкого клиента» разрабатываются с использованием технологии ASP .NET, а для создания «толстого клиента» – с использованием Visual Basic .NET.

## Структура базы данных

Структура разработанной базы данных представлена на рис. 2. Как видно из рис. 2, она состоит из следующих таблиц:

- 1) Classes – наименования классов (поле name\_class);
- 2) Groups – наименования групп (поле name\_group);
- 3) Objects – наименования объектов (поле name\_object);
- 4) GroupsValues – параметры, характерные для групп;
- 5) ObjectsValues – значения параметров для конкретных объектов (поле d\_value);
- 6) Attributes – наименование параметров (поле name\_attribute);
- 7) Dimensions – полное (поле name\_dimension), сокращенное (поле short\_dimension) наименование и размерность (поле type\_dimensions) единиц измерения.
- 8) Relationships – отношения (поле relationship) между группами (поля main\_group и related\_group) объектов.

Все таблицы связаны между собой посредством уникальных идентификаторов (поля с префиксом id).

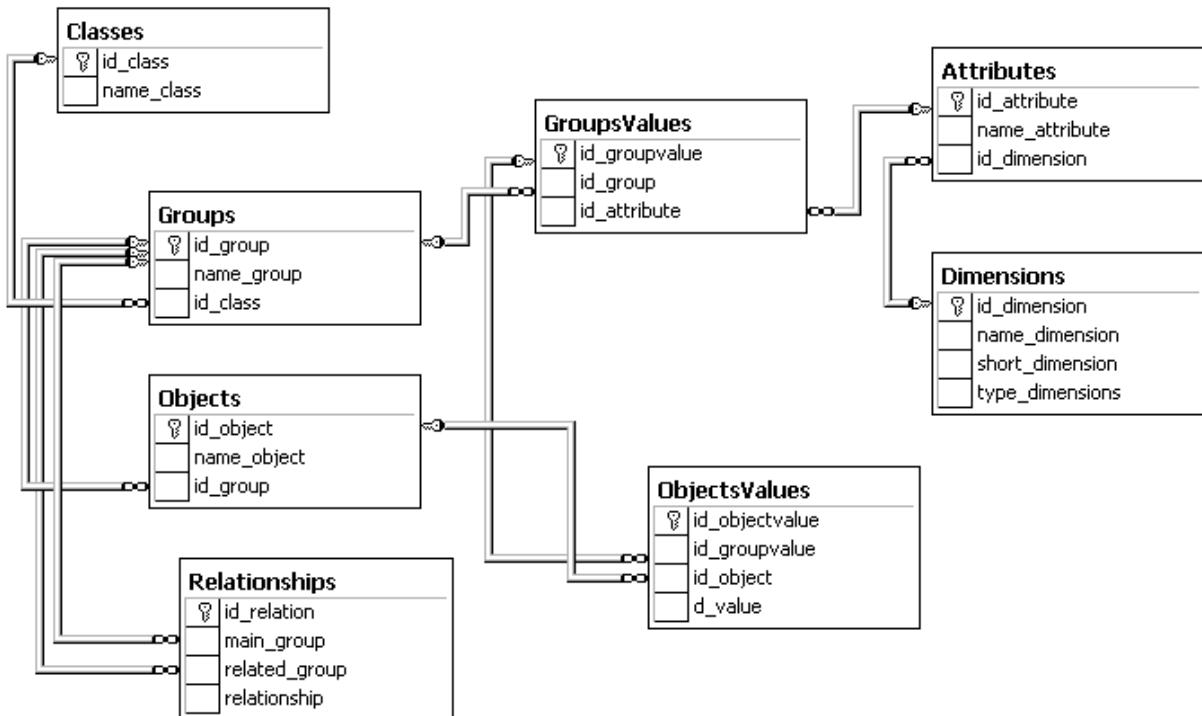


Рис. 2. Структура базы технологического назначения

### Заключение

В статье рассмотрены особенности организации удаленных баз данных технологического назначения. Приведен один из возможных подходов к их реализации, основанный на выделении классов и групп объектов с одинаковыми признаками. Представлена модель базы общей базы данных технологического назначения, реализованной в MS SQL Server 2000.

### Литература

1. Организация баз данных. 1 часть: Курс лекций / Е.В. Сопченко, К.А. Кудрин. Самара: Самарский гос. аэрокосмический ун-т, 2000.
2. Казеннов Г.Г. Основы построения САПР и АСТПП: Учебник. М.: Высшая школа, 1989.
3. Рейли Д. Создание приложений Microsoft ASP.NET. М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция», 2002.
4. Тихомиров MS SQL Server 2000: разработка приложений. СПб: БХВ-Петербург, 2000.

# АППАРАТУРА СИТОН НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ И ЕЕ ЭФФЕКТИВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ

В.А. Валетов, Д.В. Васильков, С.Ю. Иванов

Неразрушающий контроль технологических остаточных напряжений (ТОН) в деталях приборов и машин - важнейшая теоретическая и практическая проблема. Многолетние попытки решения этой проблемы пока не получили приемлемого решения. Наиболее перспективным направлением представляется использование метода так называемого АФЧХ тестирования, разработанного авторами доклада.

Аппаратура СИТОН [1] позволяет осуществлять измерение механических напряжений (технологических, остаточных и эксплуатационных) в металле поверхностного слоя изделия неразрушающим методом АФЧХ-тестирования. Аппаратура включает переносной модуль, специальный электроконтактный датчик и персональный компьютер (рис. 1). Метод АФЧХ-тестирования реализуется путем пропускания электрического тока переменной частоты через исследуемый участок поверхности. Переносной модуль управляет в автоматическом режиме частотой измерительного сигнала. Специальный алгоритм позволяет по измеренным электрическим величинам определить величину средних напряжений в  $h$ -слое с последующим пересчетом в интеграл напряжений и действительные напряжения. Сканирование осуществляется на 3–24 ступенях в зависимости от модификации прибора. Имеется достаточно большой опыт применения аппаратуры на машиностроительных предприятиях различного профиля.

Аппаратура СИТОН имеет следующие основные назначения.

- Определение неразрушающим методом остаточных и эксплуатационных напряжений  $\sigma$ , МПа в поверхностном слое металлов и сплавов на глубинах  $h_1, h_2, \dots, h_{\max}$ .
- Сплошной неразрушающий контроль ответственных изделий; контроль стабильности технологии; отбраковка изделий; контроль качества сварных соединений.
- Повышение безопасности эксплуатации и паспортизация напряженно-деформированного состояния высоконагруженных металлоконструкций, прогнозирование остаточного ресурса.

В настоящее время аппаратура имеет два базовых исполнения.

Стационарный прибор СИТОН-АРМ – многофункциональный переносной прибор (рис. 1), соединенный с компьютером. Число ступеней сканирования для базового исполнения – 24. Расчетная погрешность определения механических напряжений 20–40 МПа. База замера – 35 мм. Максимальная глубина определения напряжений – 2,5 мм (для сталей). Электронный блок может работать в режиме сборщика данных. Для этого он имеет встроенный блок автономного питания. В данном режиме может быть принято до 250 измерений.

Переносной прибор СИТОН-ПП – автономный прибор (рис. 2), работающий в режиме сборщика данных с последующей передачей их в компьютер. Число ступеней сканирования для базового исполнения – 4. Расчетная погрешность определения механических напряжений 20–60 МПа. База замера – 35 мм. Максимальная глубина определения напряжений – 2 мм (для сталей). Время автономной работы – 2 часа.

О характере распределения остаточных напряжений свидетельствует эпюра напряжений (рис. 3). Для сопоставления эпюра как функций необходимо применение специального математического аппарата [2], позволяющего вычислять метрические соотношения и функционалы. Для практических целей удобнее параметризовать эпюру напряжений путем введения ряда параметров, представленных на рис. 3. Указанные параметры достаточно полно отображают характер напряженного состояния металла поверхностного слоя изделия.



Рис.1. Внешний вид аппаратуры СИТОН-АРМ

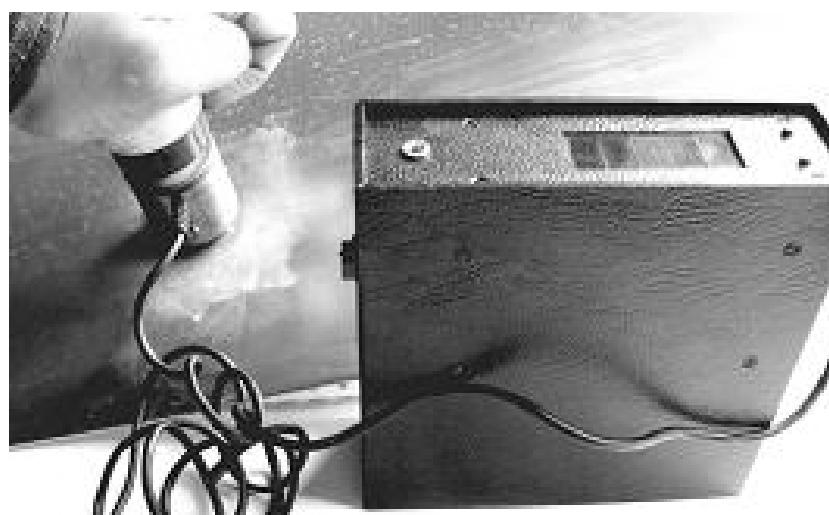


Рис. 2. Внешний вид прибора СИТОН-ПП

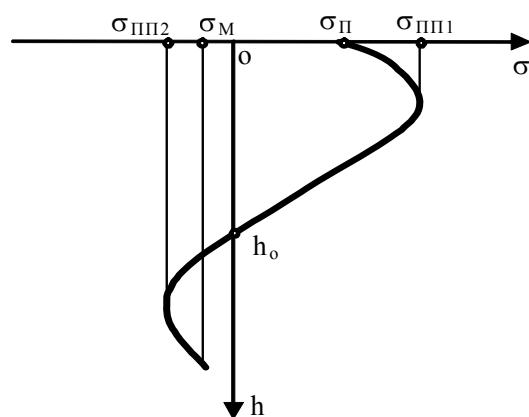


Рис. 3. Особые точки на эпюре остаточных напряжений:  $\sigma_{\Pi}$  – напряжения на поверхности, МПа;  $\sigma_{\Pi 1}$  – напряжения максимальные подповерхностные 1 до точки перехода нуля, МПа;  $\sigma_{\Pi 2}$  – напряжения максимальные подповерхностные 2 после точки перехода нуля, МПа;  $\sigma_m$  – напряжения на выбеге эпюры, МПа;  $h_0$  – точка перехода нуля эпюры напряжений, мкм

Рассмотрим применение аппаратуры СИТОН при проведении усталостных испытаний балки со сварным соединением. Основным видом испытаний являлось циклическое воздействие на образец на испытательной машине МУП-50 с периодическим контролем остаточных напряжений неразрушающим методом АФЧХ-тестирования аппаратурой СИТОН-АРМ. Испытывалась на усталостный изгиб сварная балка из стали ЕН40 ( $\sigma_m = 390$  МПа;  $\sigma_e = 550 - 650$  МПа), частота приложения нагрузки (пульсации) 500 циклов/мин. Геометрические характеристики балки и схема приложения нагрузки даны на рис. 4 (в мм). Прикладываемое усилие  $P$  изменялось в диапазоне (2–24) т.

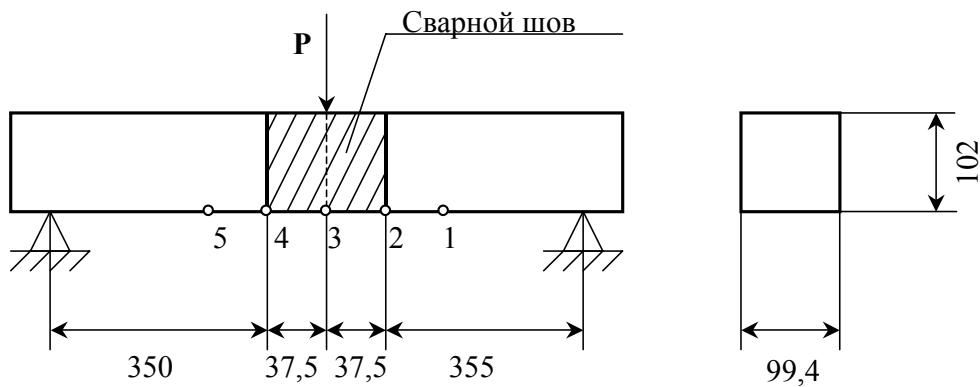


Рис. 4. Схема балки и пять (1-5) точек измерения: точки 1 и 5 – вне зоны сварного шва; точка 3 – сварной шов; точки 2 и 4 – граница сварной шов-балка

В процессе испытаний в указанных на рис. 4 областях точек (1–5) (рис. 4, 5) проводились измерения остаточных напряжений с помощью аппаратуры СИТОН-АРМ через каждые 100000 циклов нагружения (104200, 189700, 303000, 397000, 431800). По полученным эпюрам остаточных напряжений был проведен анализ, который показал следующие результаты.

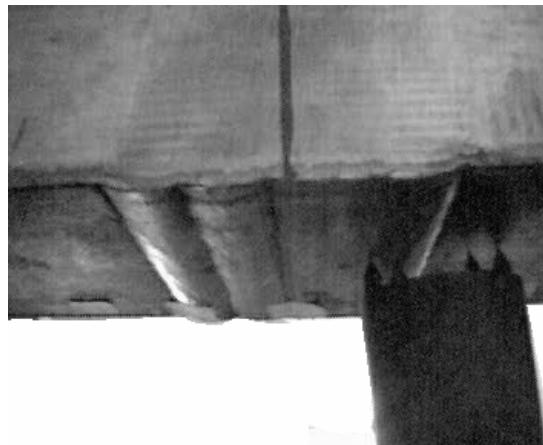


Рис. 5. Датчик установлен в область 4-ой точки

1. Общий характер распределения остаточных напряжений (эпюра) сохранялся во всех точках (1,2,4,5) до 303000 циклов нагружения (рис. 6).

2. После 397000 циклов нагружения в области точки 2 наблюдалось заметное снижение уровня остаточных напряжений на глубине более 150 мкм – с 60–75 МПа до 25–30 МПа и в дальнейшем, при 431800 пульсациях – разрушении балки – зафиксированы остаточные напряжения от 0 до 25 МПа.

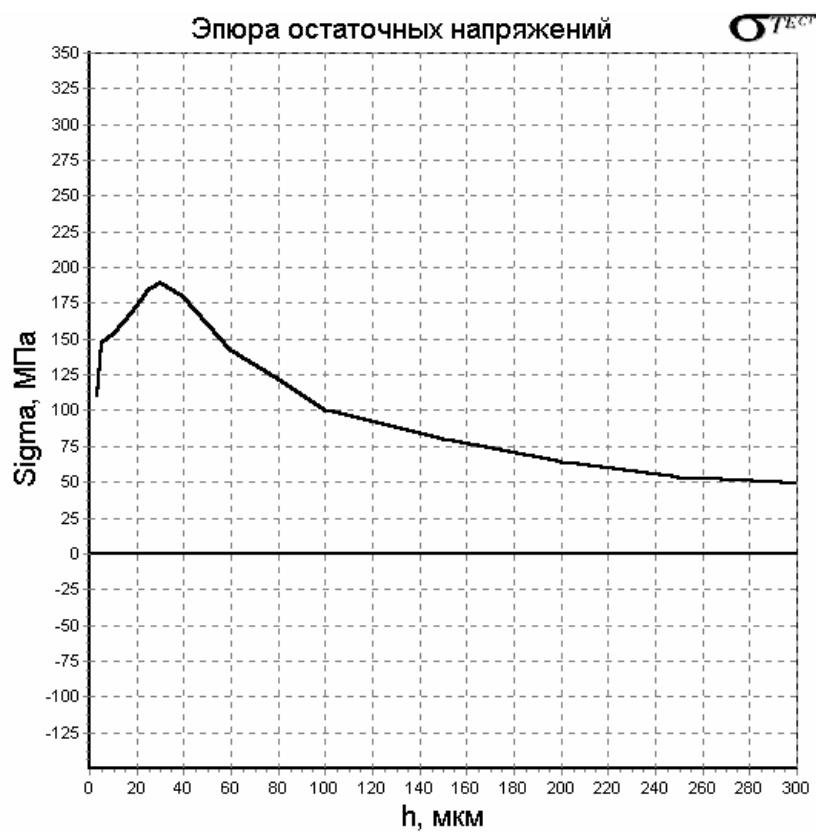


Рис. 6. Характерная эпюра остаточных напряжений до 303000 циклов нагружения

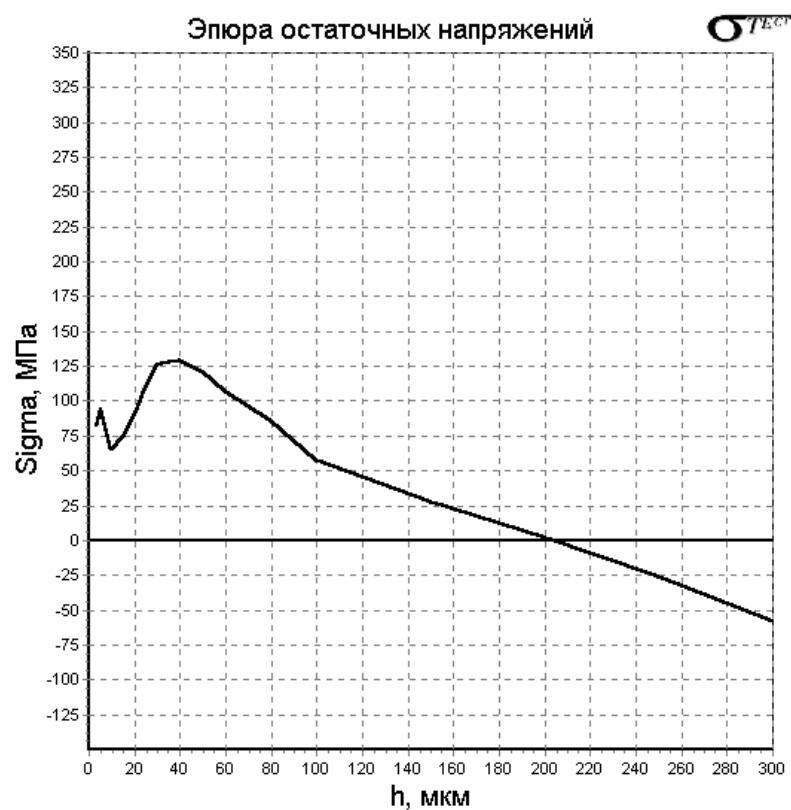


Рис. 7. Релаксация эпюры остаточных напряжений после 397000 циклов нагружения

3. После 397000 циклов нагружения в области точки 4 до появления видимых дефектов наблюдалась значительная аномалия в эпюре остаточных напряжений – значительная релаксация напряжений практически по всей эпюре (рис. 7). Подповерхностные напряжения уменьшились со 180 МПа до 125 МПа, на глубине 200 мкм наблюдается изменение знака напряжений с величиной до – 50 МПа на глубине 300 мкм.

4. Разрушение балки произошло по границе сварного шва в области точки 4 через 431 800 циклов, т.е. через 34800 циклов после обнаружения аномальных проявлений в эпюре остаточных напряжений.

5. После разрушения образца аномальный характер эпюры остаточных напряжений сохранился.

Результаты усталостных испытаний показали, что неразрушающий метод АФЧХ-тестирования, реализованный в аппаратуре СИТОН-АРМ, позволил предсказать место и время разрушения образца. Ограничение остаточного ресурса образца в процессе испытаний проявилось после 400000 циклов нагружения через активную релаксацию эпюры остаточных напряжений за 34800 циклов до разрушения. При измерении остаточных напряжений через каждые 100000 циклов нагружения эпюра практически не менялась, что свидетельствовало о целостности образца, подтверждении его ресурсных характеристик и возможности продолжения испытаний до следующего измерения

### Литература

1. Васильков Д.В. Иванов С.Ю. Васильев Д.В. Применение аппаратуры СИТОН для исследования технологической наследственности при изготовлении деталей летательных аппаратов. // Инструмент и технологии. 2004. № 19–20. С. 24–30.
2. Валетов В.А., Третьяков С.Д. Исследование изменения микрогеометрии в парах трения-скольжения. / Сборник докладов Международной научно-практической конференции. 24-26 июня 2003 года. С. 40-43.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ RP – ТЕХНОЛОГИЙ В ПРИБОРОСТРОЕНИИ

## С.В. Бобцова

RP-технологии – новейшее достижение технологической науки и практики. Они произвели подлинную революцию во всем процессе создания изделий – от их проектирования до изготовления и эксплуатации. Эти технологии позволяют получить большой экономический эффект как на этапе проектирования, так и на этапе изготовления изделия.

### Введение

В 1987 г. впервые появились так называемые технологии быстрого прототипирования. Удалось напрямую по компьютерным данным изготовить трехмерную модель будущего изделия. Модели могли принимать практически любую форму. Внутренние полости и отверстия получались без применения механической обработки [1, 2].

В течение нескольких лет полученные таким способом модели использовались исключительно для визуальной оценки дизайна будущего изделия. Их использование в качестве функциональных моделей с выводами о механических или термических нагрузках было невозможно, так как они были изготовлены из хрупкой пластмассы.

Появление данных инновационных технологий дало возможность отказаться не только от специальных инструментов, форм и приспособлений, но и от традиционных станков. Было достаточно компьютерной программы, которая содержала 3х-мерную геометрическую информацию, и машины, которая бы послойно преобразовывала эту информацию посредством фотополимеризации в геометрическую модель. Метод получил название «Стереолитография», а машина – «Стереолитографический аппарат». Стереолитография возглавила целый ряд «быстрых» способов построения моделей, которые стали известны под названием «Rapid Prototyping».

В процессе развития данных технологий появлялись все новые способы, новые материалы, благодаря которым удалось существенно улучшить физические и технические свойства моделей, что позволило использовать изготавливаемые модели в качестве функциональных моделей, геометрических прототипов. Точность, которая достигнута на сегодняшний день, позволяет проверять изготовленные изделия на собираемость.

За последние несколько лет произошли существенные изменения в новых технологиях. Появилась возможность использования данных технологий в промышленности и, в частности, в приборостроении.

Ранее использования полученных моделей было ограничено вследствие их хрупкости. Но по мере расширения палитры материалов искались пути устранения ограничений. Так появилась технология, которая на сегодняшний день является самой распространенной – литье в эластичные силиконовые формы в вакууме.

### Литье в эластичные силиконовые формы в вакууме

Литье в вакууме в эластичные формы – это процесс получения опытных образцов и небольших партий пластмассовых и восковых деталей любой сложности и габаритов без изготовления стандартной оснастки за очень короткое время. Благодаря использованию широкой гаммы материалов отливаемые копии могут быть эластичными, жесткими, термостойкими, прозрачными, а также различных цветов. Принцип изготовления деталей по технологии литья в эластичные формы заключается в абсолютно точном копировании модели. Форма изготавливается заливкой полимеризующегося силикона вокруг модели. Модель удаляется из силиконовой формы после надреза формы по разделительной плоскости. Далее в силиконовую форму можно залить любую из имеющихся в широкой номенклатуре двухкомпонентных полиуретановых смол. Литье

евые смолы смешиваются в вакуумной камере установки, управляемой компьютером, и автоматически заливаются в силиконовую форму (см. рис. 1).

Возможность воспроизведения сложных форм, мельчайших деталей, любой текстуры поверхности и цвета обеспечивают смолы для литья в вакууме, имеющие различную твердость и термостойкость, что позволяет имитировать большинство пластмасс, резин и стекол, используемых в современном производстве. Технология литья в силиконовые формы в вакууме позволяет:

- проверить собираемость и работоспособность конструкций;
- отработать дизайн изделия;
- изготовить партию опытных образцов в течение нескольких часов после изготовления силиконовой формы;
- провести маркетинговые исследования.

Основные преимущества при применении этой технологии:

- сложные поверхности, мельчайшие детали и любые текстуры полностью воспроизводятся эластичной силиконовой формой;
- опытные образцы могут быть готовы уже через несколько дней;
- можно использовать различные материалы для получения копий и оценить их конструкцию и потребительские свойства до изготовления серийной оснастки;
- высокая точность изготовления образцов позволяет реально оценить собираемость и работоспособность сложных изделий и, при необходимости, быстро осуществить соответствующие доработки;
- различные варианты окраски образцов, изготовленных в одной форме, позволяют уточнить внешний вид изделия.

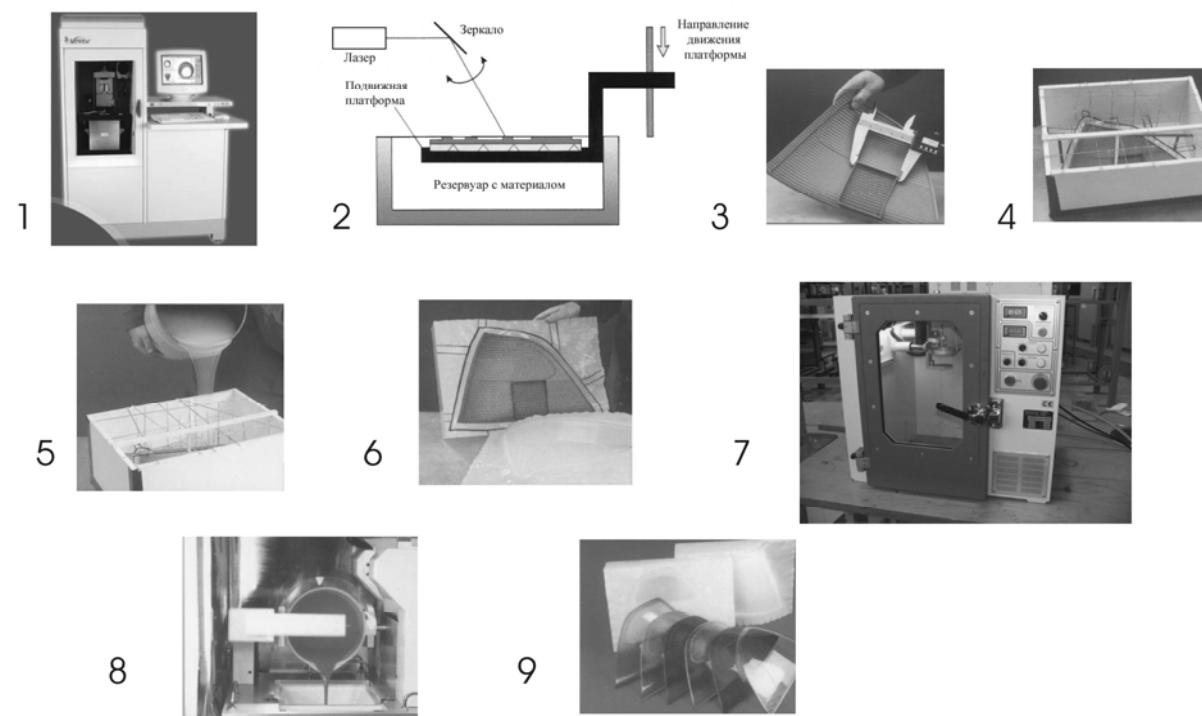


Рис. 1. Подробная схема литья в эластичную форму

Несмотря на описанные преимущества технологии литья в вакууме, ей присущи и недостатки. С помощью силиконовых форм можно изготовить лишь ограниченное число деталей (до 30 изделий). Силиконовая форма изготавливается за очень короткое время – приблизительно за шесть часов после получения стереолитографической мо-

дели. Однако для получения полиуретановой копии требуется гораздо больше времени. Как правило, в день можно изготовить 4–8 деталей. Проблемы нет, если требуется только несколько прототипов. Однако, если необходимо изготовить 50–100 прототипов для проведения испытаний с разрушением образцов или для изучения рынка сбыта, то, хотя на изготовление нескольких форм потребуется немного времени, но на получение копий нужно будет несколько недель. На рис. 1 представлена вся цепочка изготовления изделия.

Технология, получившая широчайшее распространение, продолжала развиваться, в результате чего была получена возможность изготавливать реальные металлические изделия [3].

Вместо промышленной пластмассы в силиконовую форму заливают воск. После изготовления восковой модели следует ее доработка, т.е. удаляются литники и выпоры. Модель помещается в опоку и под вакуумом заливается керамикой. Далее следует термообработка в печи, после чего производится заливка металлом. Таким образом, готовое металлическое изделие можно получить уже через несколько часов после получения заказа.

### Лазерное плавление

SLM (Selective Laser Melting, лазерное плавление) – это одна из самых новых технологий, позволяющая получать напрямую металлические изделия, не требующая изготовления вообще никакой оснастки (см. рис. 2).

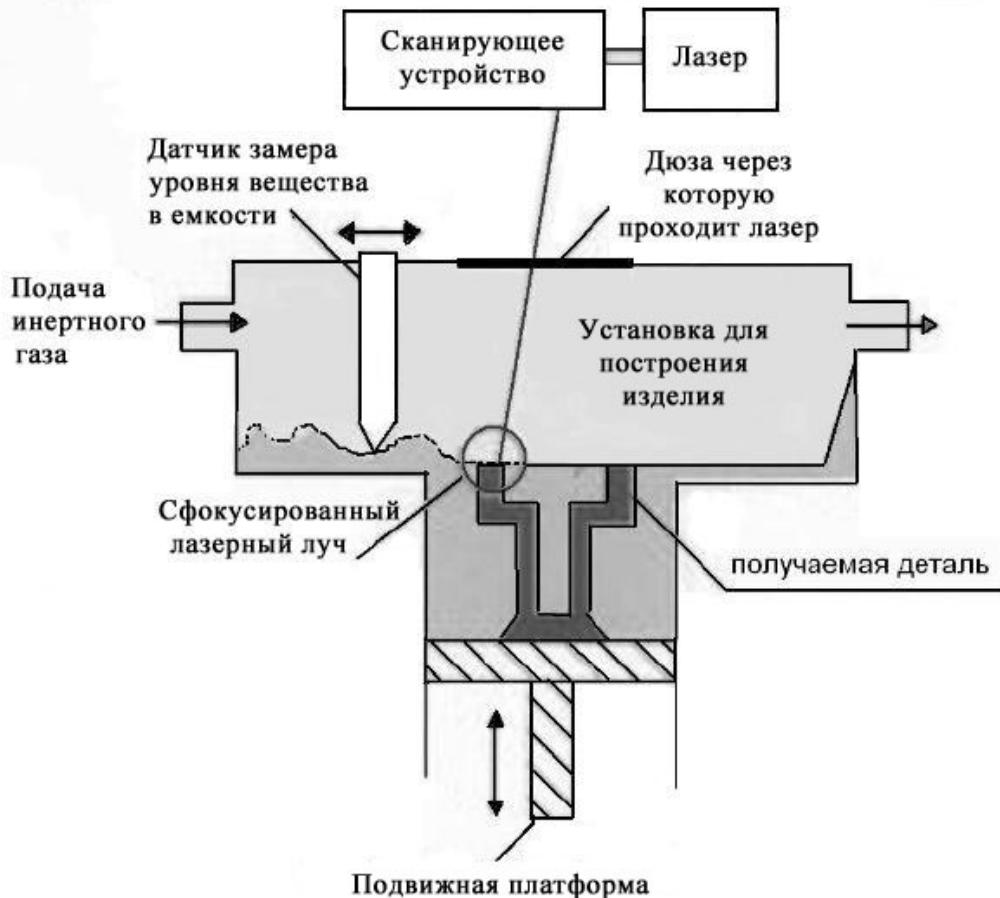


Рис. 2. Процесс лазерного плавления

Лазерное плавление – новый технологический процесс, разработанный специально для прямого изготовления различных металлических изделий. Эта технология по-

зволяет изготавливать пуансоны, матрицы, вставки в пресс-формы, а также детали различного назначения, которые можно использовать, например, в медицине для имплантантов.

Преимущества данного метода:

- изделия могут изготавливаться почти изо всех стандартных металлических порошков или керамических материалов (таких как цинк, бронза, инструментальная сталь, титан, алюминиевый порошок);
- все изделия обладают однородной структурой и требуемой плотностью;
- экономия затрат и времени за счет более короткой цепочки изготовления, так как нет необходимости в дополнительной термической обработке;
- быстрый (всего несколько часов) и несложный технологический процесс – от трехмерных компьютерных данных до изготовления готового изделия;
- при изготовлении пресс-формы все поверхности и каналы охлаждения формируются параллельно, что значительно сокращает время цикла при литье изделий;
- точное и детальное построение изделия со скоростью  $5 \text{ см}^3/\text{час}$  (среднее значение), никаких термических и механических обработок не требуется;
- быстрый и автоматизированный процесс – идеально для «изделия за ночь».

## Заключение

Можно с уверенностью сказать, что на сегодняшний день нет ни одной отрасли, где бы не применялись данные технологии. Фирмы, которые используют технологии быстрого прототипирования, значительно выигрывают во времени, а, следовательно, получают большую прибыль, чем конкуренты.

## Литература

1. Бобцова С.В., Валетов В.А. Возможности использования технологий быстрого прототипирования в приборостроении. // Научно-технический вестник СПбГИТМО (ТУ). 2001. № 3. С. 97–103.
3. Валетов В.А., Бобцова С.В. Влияние RP-технологий на качество изделий. // Инструмент и технологии. 2004. №19-20. С. 20–24.
4. Валетов В.А., Бобцова С.В. Технология быстрых прототипов и их использование в приборостроении. / Фундаментальные и прикладные проблемы теории точности процессов, машин, приборов и систем. СПб, часть 2. С. 154–160.

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДАПТИВНО-СЕЛЕКТИВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ СБОРКИ МИКРООБЪЕКТИВОВ

Ю.В. Еремин

Селективная сборка – одна из самых технически и экономически выгодных сборочных технологий. Единственным существенным недостатком этой технологии является невозможность ее использования в условиях серийного и, тем более, мелкосерийного производства. Расширение области применения селективной сборки – интересная и актуальная задача, которая решается введением в нее адаптивного компонента, т.е. с помощью адаптивно-селективной сборки (АСС).

Обеспечение требуемой точности в приборостроении – одна из важнейших проблем. Точность изготовления деталей – один из основных критериев качества приборов. Но этот критерий зависит не только от точности изготовления самих деталей, но и от точности их сборки. Допуск любой посадки представляет собой сумму допусков на размеры сопрягаемых поверхностей, а рассеяние функциональных характеристик узла или прибора в той или иной мере зависит от допусков, которые реализуются в процессе сборки. Именно на этапе сборки становятся явными дефекты изготовления комплектующих, их несоответствие техническим и точностным требованиям. Поэтому обеспечение высокой точности сборки является особенно сложным и важным.

В условиях рыночной экономики, чтобы выжить и иметь возможность развиваться и получать прибыль, производитель должен изготавливать конкурентоспособную продукцию. Конкурентоспособность определяется качеством изготовления изделия и его себестоимостью. Качество изделия определяется точностью изготовления комплектующих, а также качеством сборки. Себестоимость в большей степени зависит от стоимости материалов, затраченных на изготовление изделия, затрат на изготовление комплектующих и затрат на сборочный процесс.

При серийном производстве микрообъективов сборочный процесс является наиболее трудоемким, дорогостоящим и ответственным. К нему предъявляются повышенные требования. Поэтому производитель в условиях конкуренции и рыночной экономики должен решать задачу минимизации затрат на изготовление прибора, что одновременно подразумевает снижение затрат на изготовление деталей и узлов, а также затрат на сборку. Поэтому во многих случаях сборочный процесс является решающим этапом, дающим предприятию возможность выжить и получать прибыль в жестких экономических рамках.

В настоящее время самое большое число заказов составляют заказы на средние серии изделий. Как правило, осуществление таких заказов связано с очень узкими временными рамками и сопровождается изменением требований заказчика к характеристикам изделия непосредственно на этапе его изготовления. Поэтому производственная линия должна обладать достаточной гибкостью. Итак, в условиях современного серийного производства, жестких экономических рамок и высоких требований, предъявляемых к точности изделия, требуется, в первую очередь, сборочные технологии, отвечающие одновременно следующим требованиям:

- минимизация производственных затрат;
- изыскание возможности максимального применения уже имеющегося производственно-технического парка оборудования для изготовления деталей и сборочных единиц;
- гибкость производственных систем [2].

На сегодняшний день такой технологией является АСС, основанная на принципах селективной сборочной технологии и обладающая предельно возможной на сегодняшний день гибкостью. Математический аппарат АСС базируется на точностном расчете, в основу которого положено принятие реальных кривых распределения действитель-

ных размеров величин влияния и гибкой системе определения и оптимизации границ их групп допусков.

Лежащий в основе АСС адаптивный компонент нацелен на реализацию сложнейшей задачи – установления адаптивной связи между процессами изготовления деталей и их сборки. Именно реализация этого адаптивного компонента и использование в АСС развитого и усовершенствованного математического аппарата лишает данную технологию недостатков, присущих селективной сборке, и делает возможным ее применение для условий мелкосерийного и серийного производства.

При использовании АСС бесспорно увеличиваются затраты на организацию и проведение сборочного процесса, но эти затраты незначительны по сравнению с выгодой, которая достигается за счет гибкости производственной системы в условиях реального производства. Таким образом, применение АСС – сборочной технологии для серийного и мелкосерийного производства – становится актуальной задачей, а исследование возможности применения данной технологии в различных отраслях производства – перспективной задачей [4].

Помимо модели допуска АСС, необходимо дополнительно решение следующих задач:

- определение реального вероятностного распределения признаков качества (величин влияния) узлов и отдельных деталей;
- назначение приемлемых границ групп допусков для обеспечения требуемых функциональных допусков признака качества для собираемых узлов или изделий в целом;
- коррекция границ групп допусков и параметров процесса вследствие измененияющегося во времени состояния технологического процесса;
- проведение определенной стратегии сборки в зависимости от состояния промежуточного накопителя и расхода узлов и отдельных деталей.[6]

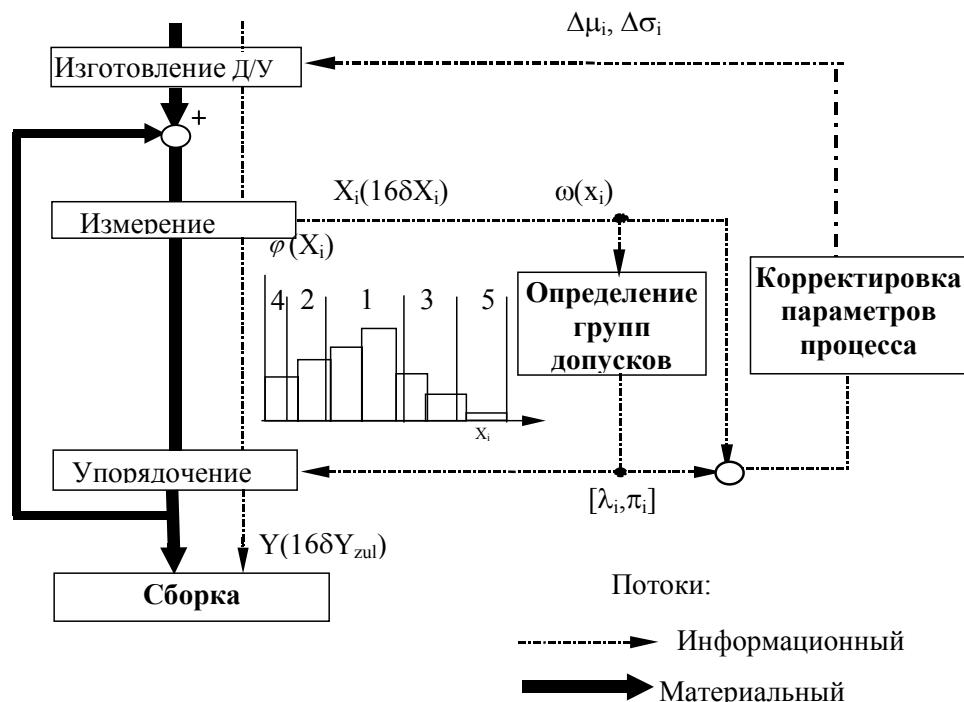


Рис. 1. Принципиальная схема адаптивно-селективной сборочной технологии

На рис. 1 представлена принципиальная схема АСС, где  $\omega(x_i)$  – реальное вероятностное распределение,  $X_i$  – признаки качества (величины влияния),  $[\lambda_{is}, \pi_{is}]$  – приемлемые границы групп допусков,  $\delta Y_{zul}$  – требуемые функциональные допуски,  $Y$  – признак

качества для собираемых узлов или изделий в целом,  $\Delta\mu_i$ ,  $\Delta\sigma_i$  – математическое ожидание и дисперсия как основные параметры управления производственным процессом [5, 7].

Рассмотрим возможность применения АСС на примере сборки объектива-стигмахромата ОСХ-40П-0. Конструкция микрообъектива с точки зрения его сборки является нетехнологичной, так как предполагает настройку, юстировку и дополнительную механическую обработку, что требует использования рабочих очень высокой квалификации [1, 3]. При этом необходимо определить по видимому изображению калибра количество и толщину деталей (регулировочные шайбы поз. 5, 6, 7, 8, 9, 10) для корректировки воздушного промежутка между линзами в сборках поз. 1 и 2.

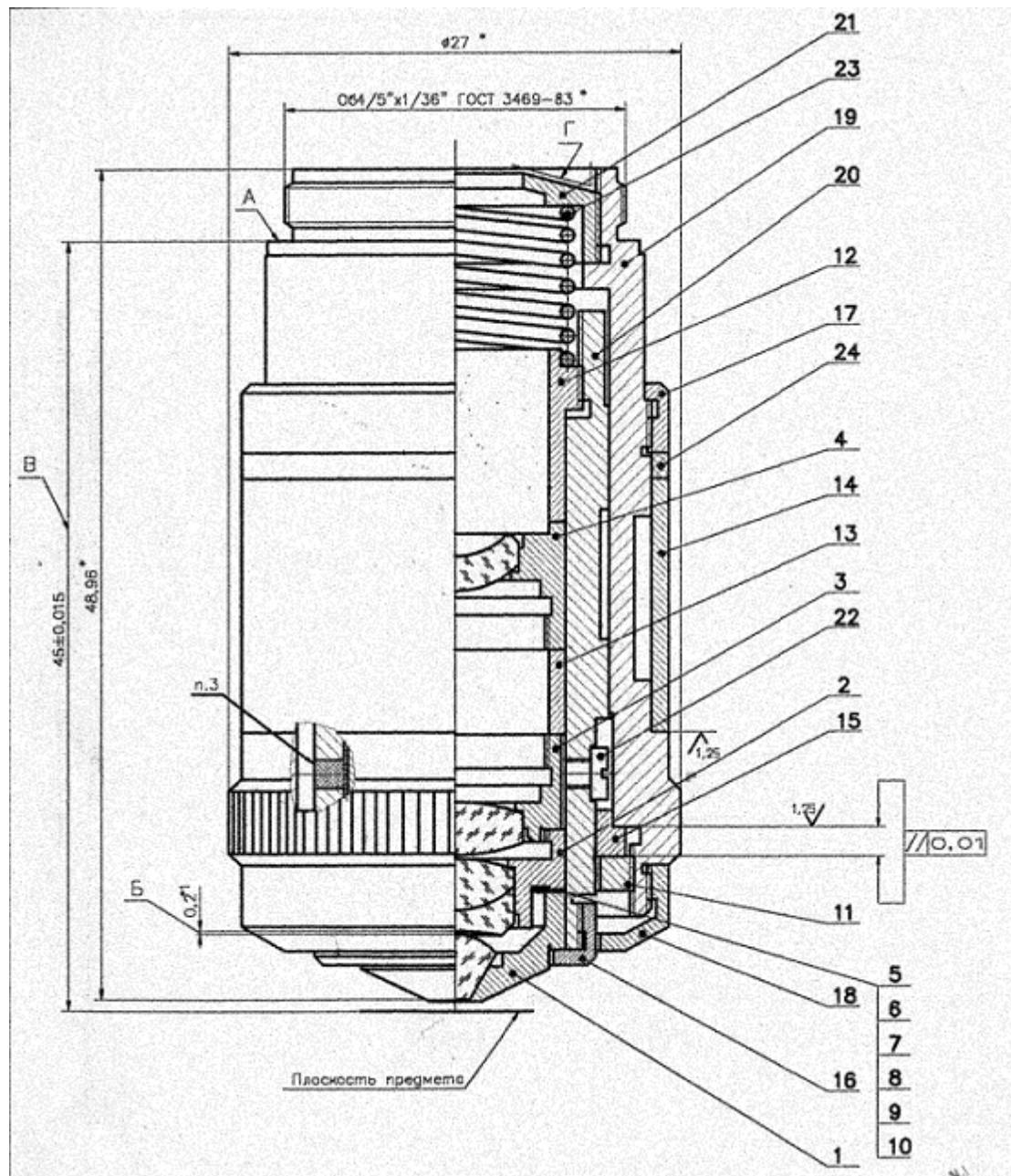


Рис. 2. Объектив-стигмахромат ОСХ-40П-0

Применение АСС для сборки микрообъектива потребует введения следующих основных операций комплектования.

1. Подбор оправ по величине смещения оптической и геометрической осей относительно друг друга и подбор корпуса или оправы поз.20 (см. рис. 2) со смещенными на аналогичную величину осями наружного и внутреннего цилиндров корпуса для компенсации данного смещения.

2. Подбор оправ по величине угла наклона линзы и ориентирование для устранения aberrаций при сборке (см. рис. 3).

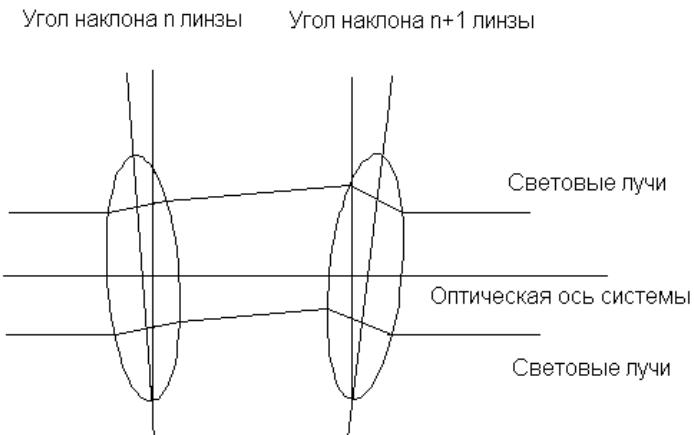


Рис. 3. Возможное положение линз относительно оптической оси

3. Получение размера  $45 \pm 0.015$  (размер от опорного торца объектива до плоскости предмета, см. рис. 2) заменой детали поз.15 на группу деталей с различным размером А (рис. 4) для замены обработки в процессе сборки на подбор необходимой детали. При этом обеспечивается совпадение плоскости предмета и точки пересечения световых лучей (см. рис. 5)

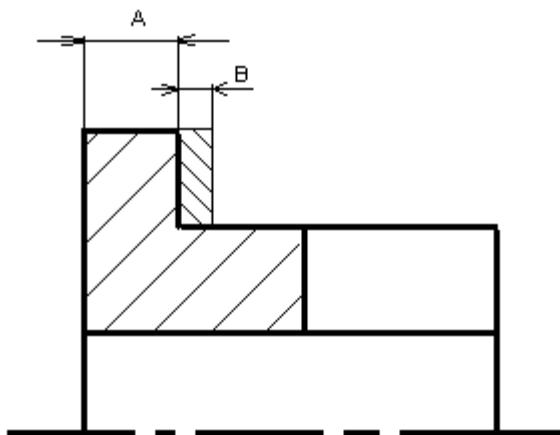


Рис. 4. Деталь поз. 15

Здесь размер В – толщина материала, который необходимо снять по существующей технологии сборки микрообъектива для компенсации всех погрешностей сборки и изготовления.

4. Центрирование оправы (рис. 2) не регулировкой, а за счет оптимизации групп допусков деталей, т.е. посредством снижения величины поля допуска сборки при указанных на чертеже допусках на изготовление деталей.

Данное изменение не только упрощает технологический сборочный процесс, исключая центрирование второй оправы, но и исключает заливку герметиком отверстий в корпусе для фиксации оправы. Также упрощается конструкция корпуса – исключением отверстий для герметика.

5. Внедрить операцию комплектования селективным способом для деталей поз.19 и 20 (см. рис. 2), так как по существующей технологии необходимый зазор контролируется по усилию перемещения деталей при их притирке, что требует высокой квалификации сборщика.

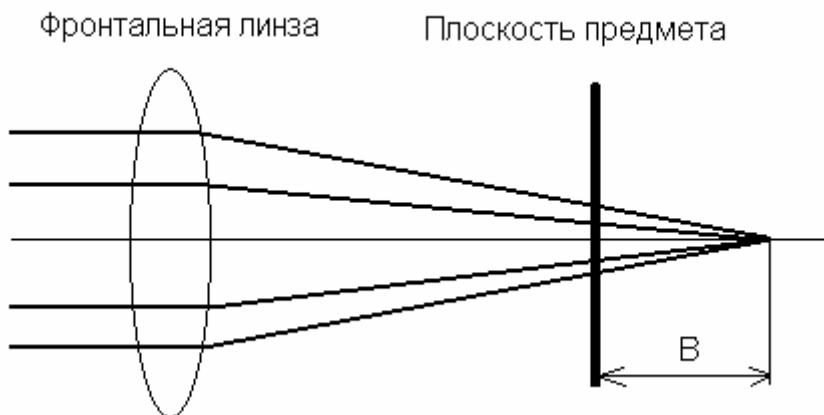


Рис. 5. Траектория лучей через оптические элементы

Благодаря данной модернизации ожидаются следующие результаты:

1. упрощение конструкции микрообъектива;
2. снижение количества операций при изготовлении деталей и сборке изделия;
3. возможность существенного расширения допусков на изготовление деталей микрообъективов, что снижает их себестоимость;
4. улучшение санитарно-гигиенических условий рабочих сборочного участка за счет исключения из сборочного процесса механической обработки (снижение шума и пыли).

Таким образом, доказана возможность применения АСС в серийном производстве для решения проблемы комплектования микрообъективов.

### Литература

1. Адамиров Ю.Д. Технологичность конструкций изделий: Справочник. М.: Машиностроение, 1985.
2. Белянина П.Н., Лещенко В.А. Гибкие производственные комплексы. М.: Машиностроение, 1984.
3. Валетов В.А., Орлова А.А.. Адаптивно-селективная сборка в серийном микроскопостроении. // Известия вузов. Приборостроение. 2002. №3.
4. Grabow J., Hess D., Zocher K.-P. Laborprüfstand für Kennlinienmessungen und Strömungsuntersuchungen an Radiallüftern (Neues Elektromotorenwerk Schleusingen). Forschungsbericht, TU-Ilmenau/ FG Fabrikbetrieb 1999.
5. Görsch D., Kosub S., Zocher K.-P. Allgemeine Systeme der Toleranzgruppenoptimierung. In: 44. IWK TU Ilmenau 1999, Band 3 – Vortragsreihe Produktion und Logistik, S. 411–416.
6. Zocher K.-P.. Qualitätssichernde Fertigungsgestaltung und -Steuerung, Teil 1-5. Vorlesungsskript TU Ilmenau. 2002.
7. Zocher K.-P., Kosub S., Görsch D. Toleranzgruppenoptimierung für die Adaptive und Selektive Montage. In: 44. IWK TU Ilmenau. 1999. Band 3 – Vortragsreihe Qualitätssicherung, S. 463-468.

# НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ МИКРОГЕОМЕТРИИ ПОВЕРХНОСТЕЙ И ЕГО ВОПЛОЩЕНИЕ ПРИ ПОМОЩИ СОВРЕМЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МАТЕМАТИКИ

А.В. Терещенко

Помимо стандартных параметров оценки микрогеометрии поверхностей уже достаточно давно был разработан другой подход к оценке микрогеометрии – непараметрический. В данной статье рассматривается сущность непараметрического подхода и пример его практической реализации в среде MATLAB.

## Стандартизованные параметры и непараметрические критерии оценки микрогеометрии

Традиционно для оценки микрогеометрии поверхности пользуются ее профилем, представляющим собой сечение поверхности плоскостью, перпендикулярной к этой поверхности и ориентированной в каком-то заданном направлении. Через величину наиболее высокой неровности и дно наиболее низко расположенной впадины проводят линии выступов и впадин, параллельные средней линии  $m-m$  (рис. 1). Характеристики профиля отсчитывают по отклонению к средней линии  $m-m$  (которая проводится так, чтобы сумма квадратов отклонений от нее точек профиля, расположенных выше и ниже средней линии, была минимальной) [1].

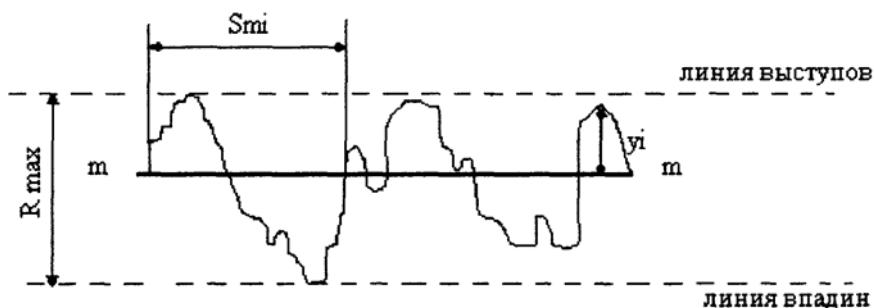


Рис. 1. Шероховатость профиля и его характеристики.

- $R_a$  – среднеарифметическое отклонение профиля,

$$R_a = 1/l \int_0^l |y| dx \approx \left( \sum_0^n |y_i| \right) / n.$$

- $R_q$  – среднеквадратическое отклонение профиля (корень квадратный из суммы квадратов расстояний точек профиля от средней линии),

$$R_q = \left( 1/l \int_0^l y_i^2 dx \right)^{0.5} \approx \left( \left( \sum_0^n y_i^2 \right) / n \right)^{0.5}.$$

- $R_z$  – высота неровностей (среднее арифметическое абсолютных отклонений находящихся в пределах базовой длины пяти наибольших минимумов и пяти наибольших максимумов),

$$R_z = (h_1 + h_3 + h_5 + h_7 + h_9) - (h_2 + h_4 + h_6 + h_8 + h_{10}) / 5.$$

- $R_p$  – высоты сглаживания (расстояние от линии выступов до средней линии в пределах базовой длины).

- $R_{max}$  – наибольшая высота неровностей профиля (расстояние между линией выступов и линией впадин).

- $Sm$  – средний шаг неровностей профиля (среднеарифметическое значение длин отрезков средней линии, равных расстоянию между двумя соседними пересечениями ее со средней линией, в пределах базовой длины).
- $tp$  – относительная опорная длина профиля.

Микрографию случайных нормально распределенных поверхностей в общем случае можно описать с помощью трех (двух) базовых критериев. Однако среди реальных поверхностей многие нельзя считать чисто случайными, а последние не всегда являются нормально распределенными. Поэтому трудно решить проблему достоверности описания микрографии поверхности с помощью различных комплексных критериев, представляющих различные комбинации из неинформационных критериев. В связи с этим возникает необходимость легкого, в производственных условиях, описания микрографии сложных поверхностей [2].

В общем случае микрография поверхности зависит от многих факторов (режимы резания, качество режущего инструмента, исходные свойства заготовки ...), поэтому ее следует рассматривать как реализацию случайного профиля, тогда профиль реальной поверхности есть реализация случайной функции [3].

Следует заметить, что наиболее полную информацию о профиле содержат плотности распределения ординат и углов наклона, а для приближенной оценки вполне достаточно функций распределения ординат и углов наклона профилей. Для оценки одного функционального свойства достаточно одного из графиков.

Суть метода заключается в практическом использовании графиков функций, показанных на рис. 2.

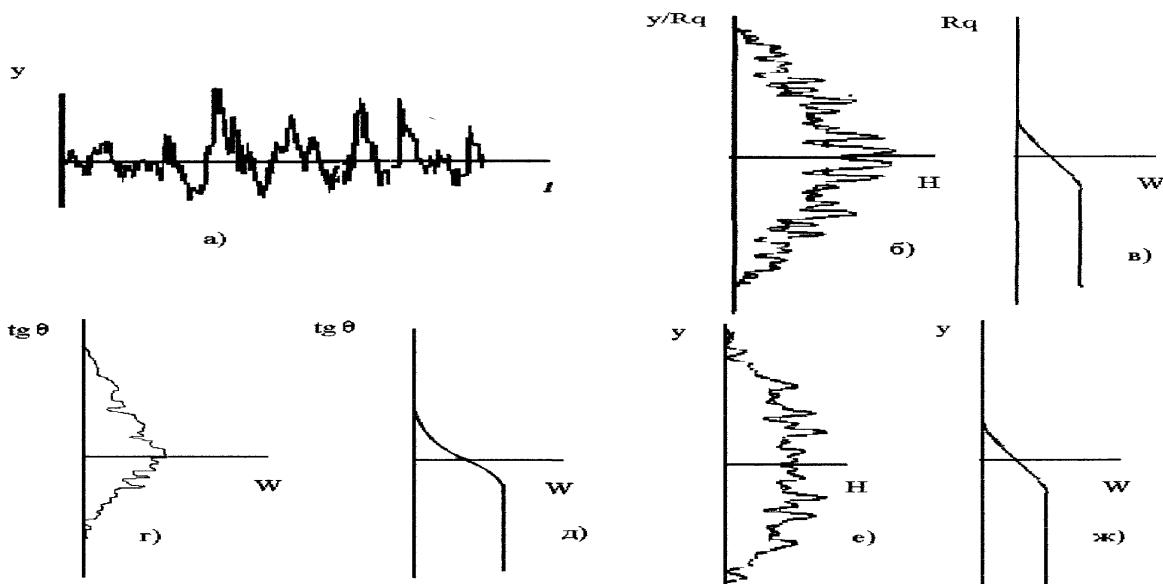


Рис. 2. а) Профиль поверхности; непараметрические критерии оценки; б) плотность распределения ординат безразмерного профиля (Н – частота, шт.;  $Rq$  – среднеквадратическое отклонение, мкм), в) распределение ординат безразмерного профиля ( $W$  – вероятность), г) плотность распределения тангенсов углов наклона профиля, д) распределения тангенсов углов наклона профиля, е) плотность распределения ординат профиля ( $y$  – отклонение профиля от средней линии, мкм), ж) распределение ординат профиля

Рассмотрим этот метод на примере. Исследуем образцы, работающие на износ, при этом их форма постепенно меняется от (а) к (б), также меняется и функция плотности распределения ординат профиля. Однако испытания показали, что годными являются профили в промежутке от (а) до (к). Тогда можно построить шаблон, включающий в себя все функции плотности распределения ординат профиля от (а) к (к), рис. 3.

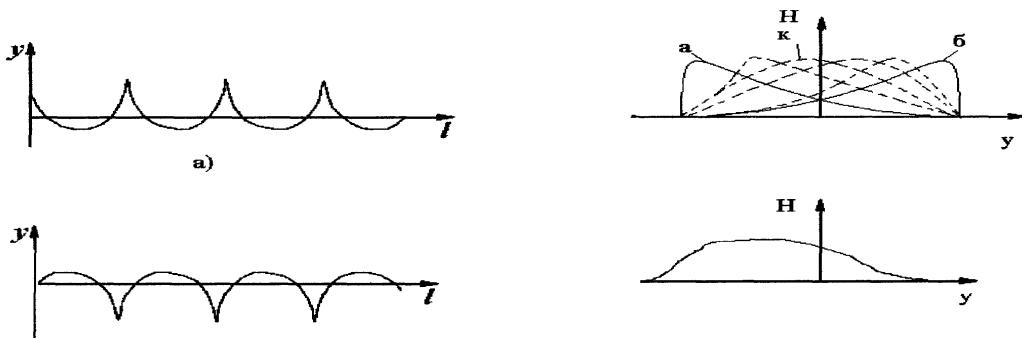


Рис. 3. Схема построения шаблона для контроля микрографии поверхности

Аналогичным образом можно построить шаблоны для функции плотности распределения тангенсов углов наклона профиля.

Экспериментальным путем для различных видов обработки конкретных материалов в определенных условиях можно получить зависимость между непараметрическими критериями оценки микрографии поверхности и параметрами режимов резания. Это дает возможность технологу обеспечить требования к микрографии поверхности, назначенные конструктором.

Также при практическом исследовании следует заметить, что удобнее применять безразмерный профиль, получаемый делением его ординат на величину  $R_a$  или  $R_q$ , что избавляет от проблемы, связанной с необходимостью строить в одном масштабе профили, ординаты которых колеблются от долей до тысяч мкм.

С помощью этого метода хорошо выявляются различия профиля, которые не видны при рассмотрении профилограмм (рис. 4).

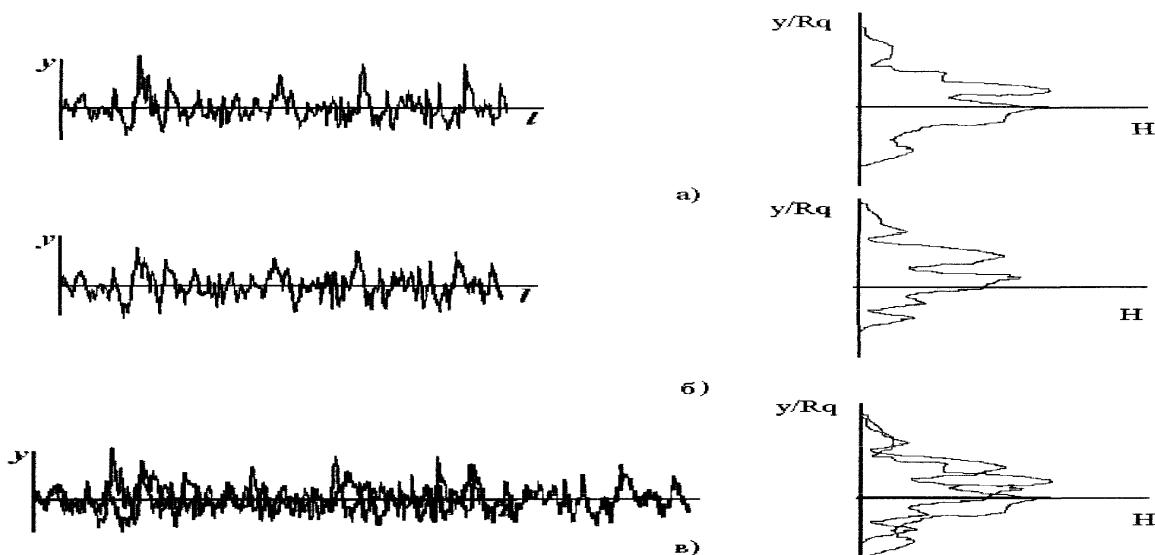


Рис. 4. Схема сравнительной оценки характера распределения амплитуд профиля (а), профили и их плотности распределения ординат безразмерного профиля (б), наложение профилей и их функций плотностей распределения ординат безразмерных профилей (в)

Этот метод позволяет определить стационарность поверхности и необходимую длину профиля, для каждого вида обработки. Рассмотрим этот вопрос более подробно.

Стационарность профиля определяют сравнением снятых в различных местах профилограмм, используя для этого непараметрические критерии. В случае положительного результата утверждают о достаточности одного профиля для того, чтобы охарактеризовать поверхность при данном виде обработки в конкретных условиях. Необходимую длину профиля определяют сравнением непараметрических критериев для

профилей различной длины и, в зависимости от наиболее значимого функционального свойства (волнистости, шероховатости, ...), выбирают минимально необходимую.

Следует заметить, что непараметрические критерии очень чувствительны к изменениям режимов резания, форме режущего клина, колебаниям системы СПИД и т.д.

Все высказанные подводят нас к утверждению, что для оценки характера поверхностей в настоящее время используют следующие параметрические и непараметрические критерии:

- функции распределения и плотности распределения ординат и тангенсов углов наклона профилей;
- функции распределения ординат безразмерного профиля;
- асимметрия и эксцесс для распределения ординат и тангенсов углов наклона профиля;
- среднеарифметическое отклонение профиля,  $Ra$ ;
- среднеквадратичное отклонение профиля,  $Rq$ ;
- наибольшее отклонение профиля,  $Rm$ .

При этом непараметрические критерии представляются намного более информативными по сравнению со стандартизованными параметрами.

### Практическое воплощение непараметрического подхода

В ходе работы по гранту [4] в среде MATLAB был разработан программный продукт, предназначенный для комплексной автоматизированной оценки и контроля микрографии поверхностей. В нем реализовано:

- получение данных о профиле поверхности непосредственно с профилографа-профилометра, подключенного к ПК;
- расчет и визуализация (с возможностью сглаживания кусочно-кубическим интерполяционным полиномом Эрмита, кубическим сплайном, полиномом 4–10-й степеней) для данного профиля непараметрических критерии оценки и контроля микрографии (плотности и функции распределения ординат профиля, плотности и функции распределения тангенсов углов наклона профиля);
- расчет стандартных параметров микрографии поверхности ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $Rq$ ,  $Rmax$ ,  $S$ ,  $Sm$ ,  $tp$ );
- фильтрация шумов, отклонений формы исследуемой поверхности для полученного профиля с помощью прямого-обратного преобразования Фурье;
- получение и обработка безразмерного профиля.

Для демонстрации (см. рис. 5) использованы данные, полученные на ИВК «Профиль», включающем в себя стандартный профилограф-профилометр Калибр-250 и интерфейс (АЦП) связи прибора с IBM-совместимым компьютером.

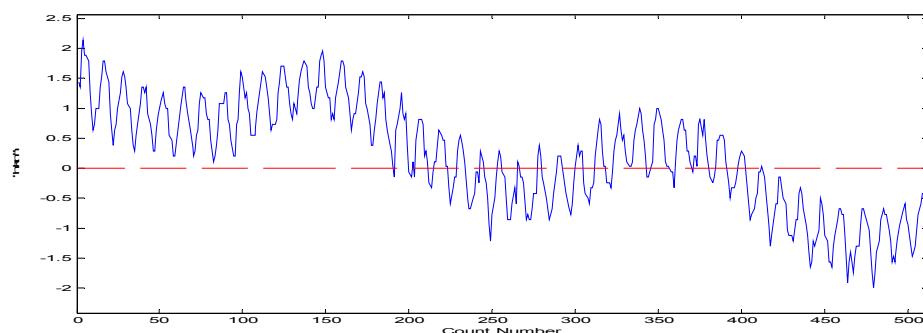


Рис. 5. Профиль поверхности, полученный на ИВК «Профиль»

Имеющиеся в составе программного продукта модули реализуют подпрограммы расчета и визуализации базовых для непараметрического подхода к анализу микрогометрии характеристик – плотности и функции распределения ординат профиля (рис. 6), а также плотности и функции распределения его тангенсов углов наклона.

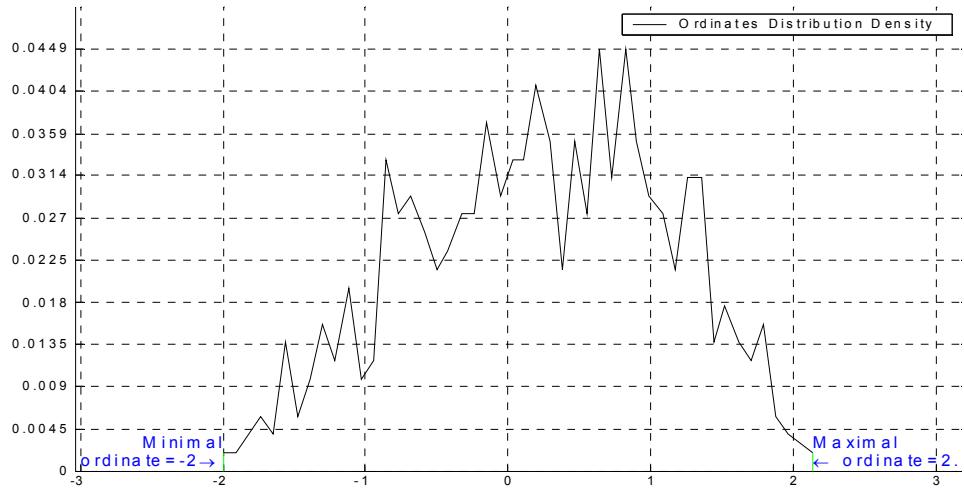


Рис. 6. Плотность распределения ординат профиля

Кроме расчета и визуализации этих характеристик возможно их сглаживание при помощи одного из трех методов: кусочно-кубического интерполяционного полинома Эрмита, кубического сплайна, полинома 4-й – 10-й степеней (рис. 7).

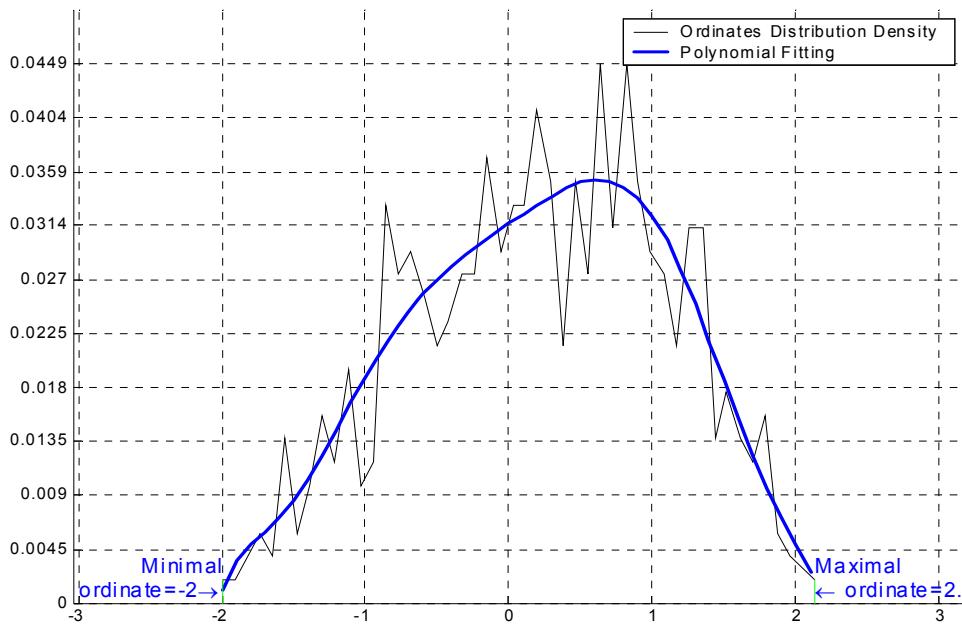


Рис. 7. Сглаживание плотности распределения ординат профиля при помощи полинома 8-й степени

Кроме получения непараметрических критериев реализована функция фильтрации отклонений формы исследуемой поверхности, а также шумов при помощи преобразования Фурье. Смысл преобразования заключается в том, что после преобразования мы получаем амплитудный спектр, по которому можно точно определить частоту и амплитуду любой гармоники и оценить, к какому виду отклонений (отклонение формы

поверхности, волнистость, погрешности установки) она относится, исключив из рассмотрения ненужные.

Путем обратного преобразования Фурье, обработав амплитудный спектр, получаем профиль, в котором исключены несущественные характеристики. Этот профиль обрабатывается любым способом для получения необходимых нам характеристик микрографии поверхности.

Таким образом, прямые и обратные преобразования Фурье профилей дают возможность наиболее полно и точно анализировать и оценивать все виды отклонений реальной поверхности как качественно, так и количественно.

Кроме того, в настоящее время исследуется возможность применения вейвлетов вместо преобразования Фурье, что, вероятно, может повысить качество очистки сигнала от помех, а, следовательно, и достоверность конечной информации.

### **Литература**

1. ГОСТ 2.789-73, ГОСТ 2.309-73 Шероховатость поверхности. М.: Издательство стандартов, 1975. 24 с.
2. Валетов В.А Оптимизация микрографии поверхностей деталей в приборостроении. Учебное пособие. Л.: ЛИТМО, 1989. 100 с.
3. Валетов В.А. Оценка шероховатости, волнистости, отклонений формы поверхностей с помощью ЭВМ. / В кн.: Технология судостроения, судового машиностроения, обработка металлов и сварка. ЛКИ, 1980. С. 133–135.
4. Персональный грант конкурса Министерства образования Российской Федерации 2004 г. для молодых ученых и специалистов Санкт-Петербурга и Северо-Запада России: «Разработка программного продукта для автоматизированного контроля микрографии поверхностей с помощью непараметрических критериев».

# АЛГОРИТМЫ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ СТУДЕНТАМ ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ОСНОВЫ ТПС»

В.Б. Мурашко

При разработке алгоритмов передачи информации по дисциплине «Основы ТПС» можно выделить три главные задачи. Первая задача заключается в подборе видео- и аудиоматериала по каждому разделу учебника. Вторая задача направлена на разработку алгоритма изучения курса, причем алгоритм изучения должен обеспечивать максимально эффективное запоминание информации. Третьей задачей является создание удобного интерфейса и дизайна видеоучебника.

Актуальность данной проблемы связана с тем, что рост и обновление информации происходит с лавинообразной скоростью, а старые методы передачи охватить всего не могут. Предлагаемую систему можно быстро обновить и, соответственно, передать информацию студентам за короткий период, так как на мозг действуют новые мультимедийные технологии (видео, аудио и цветные слайды.).

Сейчас сегмент рынка, на котором создаются видеоучебники, пустует, поэтому актуальность проблемы налицо. Разработку алгоритма структуры курса нужно начать с целей, которые мы преследуем:

- усвоение материала студентом в долговременной памяти, т.е. воздействие на соответствующий участок головного мозга;
- воспроизведение этого материала в реальных производственных условиях;
- создание реальных производственных условий, которые в университете создать невозможно из-за недостаточного финансирования;
- ознакомление студента с новыми технологиями, которых не отражены в старых и новых учебниках, а существуют лишь на рекламных сайтах и за границей.

Для достижения первой цели необходимо в алгоритм включить цикл повторения пройденного материала – сначала в текстовом формате, а затем в видеоформате, что обеспечит максимальное запоминание пройденного материала. Для достижения цели используем алгоритм, представленный на рис. 1.

Рассмотрим первый блок алгоритма, который содержит текстовую информацию. Для примера возьмем процесс фрезерования. В этом блоке идет описание физики процесса, для чего он нужен, где применяется, с какой целью. Здесь же представлены схемы и фотографии процесса. После изучения первого блока у студента формируется образ процесса фрезерования, но не до конца осмысленный. Для осмысления следует изучить второй блок, который содержит видеинформацию по процессу фрезерования. Студент смотрит фильм с комментариями, у него образ полностью осмысливается, и еще дополнительно формируется реальная обстановка, присущая предприятию, где используется механическая обработка.

Третий блок не несет информационного материала, а является лишь блоком условия. У каждого студента способность к запоминанию информации разная, поэтому, если требуется повторно изучить параграф, студент возвращается к первому блоку и затем – ко второму. Существует вероятность, что обучающийся захочет повторить только второй блок, для этого ему придется просто пропустить первый блок. Аналогично если он или она захотят изучить только первый блок, можно пропустить второй блок.

Для достижения второй цели используются рекламные ролики, т.е. непроизвольное запоминание информации. Перед изучением параграфа или после него следует рекламный ролик, демонстрирующий новую технологию, и не запомнить ее невозможно. В аудиорежиме перечисляются положительные и отрицательные качества данной технологии, и студент запоминает их. Представленные производственные участки сборочных, механических и других цехов помогут студенту очень хорошо ориентироваться на предприятии, а также принимать реальные решения, связанные с производством в це-

лом [2]. Такой подход помогает будущему технологу составлять технологические процессы, которые отличаются большой выгодностью, т.е. минимальными затратами и максимальной прибылью [2]. Такое представление образа сборочного или другого участка облегчает технологу работу по разработке технологических процессов. Эффективность этой структуры будет проявляться уже в разработке техпроцессов для курсовых работ в университете.

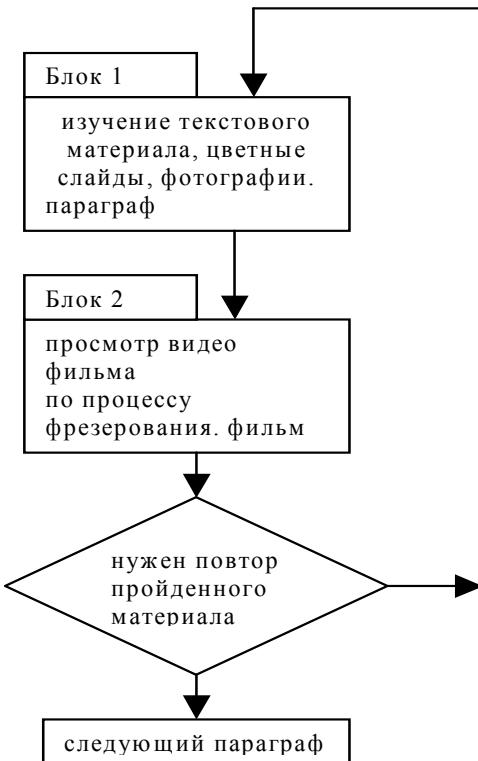


Рис 1. Алгоритм изучения учебного материала

Третья цель является очень актуальной, так как финансирование государственных учебных заведений не позволяет приобрести станки нового поколения, материальная база остается очень старой. Практика проходит на станках, давно снятых с производства. В то же время в нашем учебнике подробно, в динамике показана работа и структура станков, стоимость которых составляет тысячи долларов. В результате получается виртуальная лаборатория. С помощью учебника студент погружается в среду различных заводов. Все это расширяет знания по технологии приборостроения. Таким образом, разработанный алгоритм учитывает разные уровни восприятия информации, а также индивидуальные способности студента к запоминанию. Это помогает, если необходимо, пропускать параграфы или повторять их заново.

Основная часть проекта состоит из подбора видеинформации по курсу «Технология приборостроения». Поиск текстовой и видеинформации производился в глобальной сети Internet и по учебникам для технических вузов [3]. Поиск видеинформации – очень трудоемкий процесс, так как немногие сайты могут представить видеоматериал по технологиям приборостроения. Если же не удалось и там найти информацию, то можно воспользоваться видеокамерой, сходить на выставку новых технологий в приборостроении, заснять видео, затем оцифровать, озвучить и вставить в учебник. Также можно заснять процесс на заводе или предприятии, где он используется. Для первой процедуры поиска структура алгоритма показана на рис. 2. В табл. 1 представлена сравнительная оценка систем поиска информации.

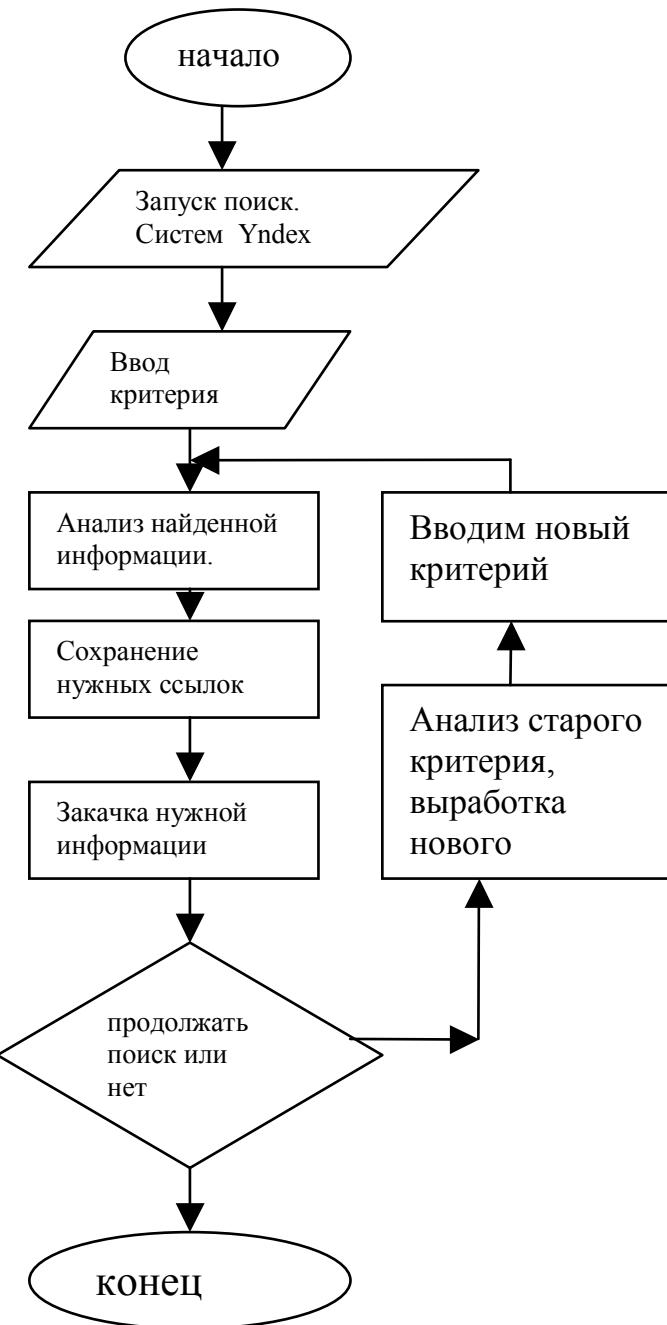


Рис. 2. Алгоритм поиска информации в Internet

Таблица 1

Ресурс	Описание
<b>Яндекс</b>	На мой взгляд, самый лучший рубрицированный каталог русского Интернета
<b>Rambler</b>	Rambler, как правило не дает информационного шума, но результаты поиска иногда малы по сравнению с Yandex
<b>АПОРТ</b> поиск в интернет	Апорт – поисковая система по российским web-ресурсам с логически завершенной тематической структурой и развитой системой ссылок на наиболее интересные и острые материалы портала в целом

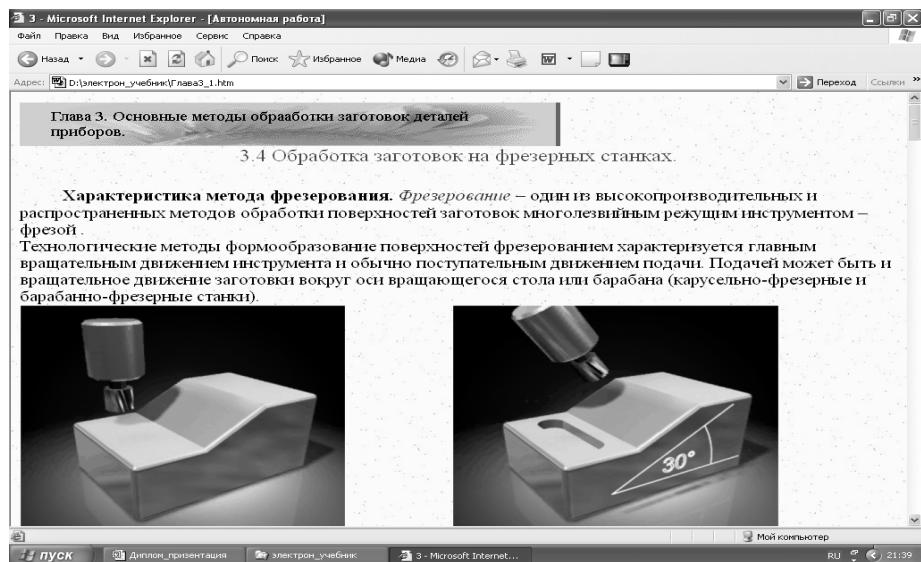


Рис 3. Пример фрагмента из видеоучебника

Видеосъемка на цифровую видеокамеру производилась на промышленных выставках по технологии приборостроения, а также на ОАО. «Звезда» и «Техприбор». Отснятый материал через USB-порт переводится в нужный формат, который необходим для создания видеоучебника. Видеоинформация может быть записана в форматах avi, mpeg, mpg. Видео монтируется и озвучивается.

Создание электронной версии учебника производилось с помощью языка гипертекстовой разметки HTML и XHTML [1]. HTML универсален, так как он работает абсолютно одинаково на любой из ныне существующих компьютерных платформ. Чтобы создавать собственные странички, не нужно приобретать специальное программное обеспечение. Для этого можно использовать любой текстовый редактор, в нашем случае использован MS Office XP, текстовый редактор Word, в режиме Web-документа [1].

В мультимедийном учебнике создана система контроля знаний по проходенному материалу. Схема работы тестов такова. После прохождения первой главы учебника студент выходит на аттестацию, если аттестация пройдена успешно, то происходит автоматический переход к следующей главе пособия. В противном случае студенту придется изучить первую главу заново, пока не пройдет аттестацию по данному разделу. Такая форма позволяет контролировать усвоение материала обучающимся, а также заинтересовывает студента, как компьютерная игра.

Данная разработка была направлена на создание алгоритмов изучения материала по курсу «Основы ТПС». Поставленные задачи – подбор видео- и аудиоматериала по каждому разделу учебника, разработка алгоритма изучения курса, создание удобного интерфейса и дизайна – были решены с заданной полнотой. В результате получился видеоучебник по курсу «Основы ТПС». Видео и анимация озвучены и подробно описаны текстовым материалом, а также имеются сравнительные анализы, выводы по различным технологиям, стоимостные оценки процессов, фотографии оборудования и процессов.

### Литература

1. HTML и XHTML – короткие уроки, быстрые результаты. М.: «Вильямс», 2002.
2. Технология машиностроения. / Под ред. А.А. Маталина. Л.: Машиностроение, 1985.
3. Технология конструкционных материалов. / Под общ. ред. проф. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 1985.

## МОДЕЛЬ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕТЕНТНОСТЬЮ В ОБЛАСТИ ИКТ ДЛЯ СИНТЕЗА МОДУЛЬНЫХ УЧЕБНЫХ КУРСОВ ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ И ПЕРЕПОДГОТОВКИ КАДРОВ

Л.С. Лисицына

Представлены результаты разработки математической модели предметной области обучения для управления формированием компетентности в области ИКТ и синтеза модульных учебных планов (курсов) на основе коллекции учебных программ и УМК.

### Введение

Кафедра «Компьютерные образовательные технологии» совместно с центром дистанционного обучения (ЦДО) Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики (СПбГУ ИТМО) ведет большую методическую и практическую работу по обучению педагогических кадров в области современных информационно-коммуникационных технологий (ИКТ). За период с сентября 2000 года по декабрь 2004 года через курсы повышения квалификации в области современных ИКТ, организованный кафедрой КОТ, прошло обучение 6595 человек: учителей, методистов и руководителей образовательных учреждений (ОУ) органов управления среднего образования г. Санкт-Петербурга и Ленинградской области, преподавателей и сотрудников вузов.

Оригинальные методики и программы обучения строятся по модульному принципу и ориентированы на различные категории слушателей. Системный подход к решению проблемы повышения квалификации кадров по всему спектру ИКТ, необходимых для обеспечения и организации учебного процесса, был обобщен в научно-исследовательской работе [1], выполненной университетом по ФЦП «Электронная Россия (2002-2010 годы)» в 2004 году. Результатом работы стало создание методического интернет-центра <http://ito-center.ifmo.ru> для поддержки курсов повышения квалификации в области ИКТ [2]; в основе центра – учебно-методические комплексы (УМК) для коллекции из 116 учебных модульных программ, обеспечивающих оригинальные методики для 723 часов учебных занятий.

### Анализ предметной области, принципы разработки

Повышение квалификации и переподготовка кадров (руководителей, преподавателей, сотрудников и IT-специалистов ОУ) в области ИКТ имеет ряд особенностей, а именно:

- наличие различных типов учебного процесса по уровням образования (общее, профессиональное, дополнительное);
- наличие различных категорий слушателей, отличающихся потребностями в компетентности по ИКТ;
- наличие остаточных знаний по отдельным темам переподготовки;
- краткосрочность и прерывность обучения.

Поэтому в основе разработки коллекции таких программ обучения должны быть следующие **принципы**:

- **достаточность:** программы обучения должны покрывать все темы изучения ИКТ, необходимые для обеспечения и организации учебного процесса на современном уровне;
- **модульность:** каждая программа обучения темы или самостоятельного раздела внутри темы должна содержать взаимосвязанные модули (части) для различных уровней переподготовки – начальный, базовый, углубленный;
- **индивидуальность и вариативность:** для различных категорий слушателей могут существовать различные аспекты изучения тем (варианты программ обучения) в рамках их должностных обязанностей;
- **的独特性:** содержание программ учебных модулей не должно перекрываться как по уровням внутри одной темы (раздела темы), так и между темами (разделами тем);
- **адаптивность:** архитектура коллекции должна быть открытой для изменения ее структуры, в ней должен существовать механизм отбора необходимой последовательности учебных модулей (синтеза учебного курса), позволяющий решить проблему достижения необходимого набора знаний и умений в ИКТ для выбранной категории обучаемых с учетом остаточных знаний;
- **минимизация затрат на переподготовку слушателей:** учебный курс, составленный из модулей коллекций, должен быть минимальным по продолжительности при условии достижения заданного набора знаний и умений.

Исходя из перечисленных выше принципов, предметную область обучения необходимо декомпозировать и затем построить модель в виде дискретного пространства  $Q$  – пространства формирования компетентности в области ИКТ для обеспечения и организации учебного пространства. **Компетентность в области ИКТ** – это набор знаний и умений (практических навыков) – множество  $X$ , каждый элемент которого  $x_i$  характеризует некоторое состояние компетентности в пространстве  $Q$ :

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}.$$

Переход от одного состояния компетентности  $x_i$  к другому  $x_j$  в пространстве  $Q$  можно осуществить с помощью одной или нескольких учебных модульных программ обучения  $p_t \in P$ , которые дополняют набор знаний и умений состояния  $x_i$  до набора знаний и умений состояния  $x_j$ .

Многоуровневая архитектура [1] модульных учебных программ разработана на основе следующей поэтапной декомпозиции предметной области обучения:

1. выделение циклов переподготовки (различных коллекций модулей);
2. выделение самостоятельных тем и разделов обучения внутри каждого цикла (горизонтальные уровни архитектуры);
3. разделение аспектов изучения темы (раздела) в зависимости от целевой аудитории;
4. распределение состояний целевой компетентности в зависимости от уровней погружения – начальный, базовый, углубленный (вертикальные уровни архитектуры).

### Модель предметной области обучения

В пространстве  $Q$  зададим отношение инцидентности между множествами  $X$  и  $P$  с помощью взвешенного ориентированного гиперграфа  $H(X, P)$ , где  $X$  – множество вершин, моделирующих различные состояния компетентности;  $P$  – множество дуг, моделирующих процесс переподготовки (учебные модули).

Рассмотрим особенности модели, которые отражают специфику данной предметной области и делают возможным разработку эффективного алгоритмического метода для управления процессом формирования компетентности в ходе синтеза учебных курсов из модулей программ коллекций.

**Взвешенность гиперграфа.** Для реализации принципа минимизации затрат на переподготовку кадров вводятся веса дуг  $L(p_i)$ , соответствующие количеству часов занятий соответствующего учебного модуля.

**Упорядоченность вершин гиперграфа.** Декомпозиция предметной области отражена в гиперграфе разбиением исходного множества  $X$  на множество непересекающихся подмножеств:

$$X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\},$$

где  $n$  – количество различных тем (разделов тем) для изучения;  $X_i$  – подмножество состояний компетентности, относящееся к данной теме (разделу темы).

Наличие в коллекции темы (раздела темы) учебных модулей с различными аспектами (например, пользовательским и программистским) и уровнями подготовки (начальным, базовым, углубленным) позволяет установить отношение порядка на подмножестве вершин  $X_i$ . Каждая вершина  $x_j \in X_i$  помечается числом (порядковым номером)  $s(x_j) = 1, 2, \dots$ . Такая разметка вершин устанавливает отношение порядка в каждом подмножестве  $X_i$ : компетентность начального уровня подготовки по данной теме (разделу темы) соответствует номеру 1, базового – 2, и т.д.

Таким образом, можно устанавливать инцидентность между вершиной целевой компетентности и упорядоченным подмножеством вершин  $X_i$  исходной компетентности, связав при этом дугой вершину целевой компетентности только с той вершиной  $x_j \in X_i$ , которая соответствует минимально допустимой исходной компетентности по данной теме (разделу темы). На рис. 1 показан фрагмент графа, в котором дуга  $(x_i, x_j)$  указывает также и на наличие отношения инцидентности с другими вершинами подмножества  $X_i$ , порядковый номер которых выше (на рисунке дуги  $(x_i, x_k)$  и  $(x_i, x_m)$  показаны штриховыми линиями).

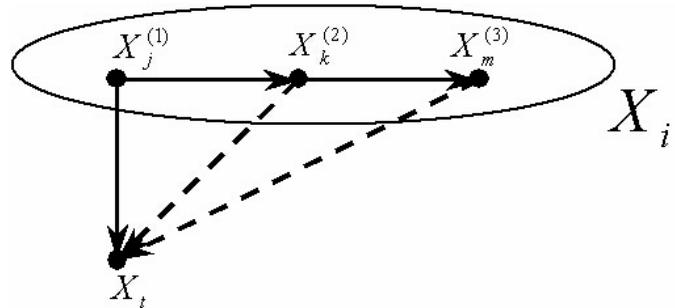


Рис. 1. Упорядоченность вершин, моделирующих состояния компетентности по теме (разделу)

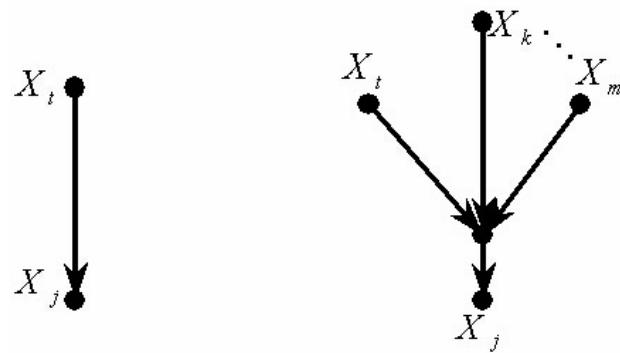


Рис. 2. Варианты отношений инцидентности в модели предметной области

**Свойства отношений.** В гиперграфе предметной области отношение инцидентности может быть (рис. 2):

- бинарным, если существует такой учебный модуль (дуга  $p_i = (x_i, x_j)$ ) в коллекции, который дополняет набор знаний и умений из состояния исходной компетентности

- (вершина графа  $x_i$ ) до целевого состояния компетентности данного модуля (вершина графа  $x_j$ ),
- $N$ -арным, если существует такой учебный модуль (ориентированное гиперребро  $p_i = \{x_i, x_k, \dots, x_m, x_j\}$ ) в коллекции, который дополняет набор знаний и умений из необходимого набора состояний исходной компетентности (вершины графа  $x_i \in X$ ) до целевого состояния компетентности данного модуля (вершина графа  $x_j$ ).

### Характерные особенности модели

1. Существует такая вершина  $x_0 \in X$ , у которой полустепень захода  $\rho^+(x_0) = 0$ : эта вершина соответствует нулевой компетентности в области ИКТ (в пределах данной коллекции).
2. Существуют такие вершины  $x_i \in X$ , у которых полустепень исхода  $\rho^-(x_0) = 0$ : эти вершины соответствуют конечным состояниям целевой компетентности в области ИКТ (в пределах данной коллекции).
3. Множество вершин гиперграфа  $X$  представляет собой упорядоченные подмножества  $X_1, X_2, \dots, X_n$  (компетентности тем и разделов тем) с заданным отношением порядка на вершинах подмножества (упорядоченные компетентности по аспектам и уровням подготовки).
4. Бинарная дуга устанавливает связь: исходная компетентность (не ниже) – учебный модуль – целевая компетентность.
5. Ориентированное гиперребро отличает одно важное свойство: всегда имеется одна и только одна вершина стока (вершина целевой компетентности) и несколько вершин истока (набор вершин минимальной исходной компетентности).
6. Переход к вершине  $x_j \in X$  (состоянию целевой компетентности) по гиперребру  $p_i = \{x_i, x_k, \dots, x_m, x_j\}$  возможен только при условии достижения всех вершин  $x_i \in \{p_i \setminus x_j\}$  (необходимого набора состояний минимальных исходных компетентностей для реализации данного учебного модуля).
7. Каждое дуга гиперграфа имеет вес (количество часов занятий модуля).

### Метод синтеза учебного курса

Пусть имеется перечень требований к целевой компетентности (набор знаний и умений в области ИКТ, который надо достичь в процессе обучения). Пусть имеется перечень состояний исходной компетентности обучаемых, установленный в процессе входной аттестации или анкетирования. Необходимо найти последовательность учебных модулей из коллекций – учебный курс, который:

- дополняет исходный набор знаний и умений до набора целевой компетентности,
- минимизирует затраты на обучение.

Используя разработанную модель предметной области в виде взвешенного ориентированного гиперграфа  $H(X, P)$ , сформулируем данную задачу в терминах теории графов [3].

Дано: В гиперграфе  $H(X, P)$  заданы два множества: множество состояний исходной компетентности  $X_{исх} \in X$  и множество состояний целевой компетентности  $X_{цел} \in X$  таких, что

$$X_{исх}, X_{цел} \neq \emptyset, X_{исх} \cap X_{цел} = \emptyset.$$

Для отсутствия знаний и умений используется состояние  $x_0$ , в этом случае  $X_{исх} = x_0$ . Тогда в связном гиперграфе  $H(X, P)$  всегда можно найти такой контрпуть  $\mu_t$ , что:

$$\forall x_k \in X_{цел} \exists \mu_t (x_k, \dots, x_i) : x_i \in X_{исх}.$$

Найти: Такое множество дуг  $P_{курс} \subset P$ , что

$$P_{\text{курс}} = \cup \mu_i \text{ и } \forall p_i \in P_{\text{курс}} (\sum L p_i \rightarrow \min)$$

Таким образом, задача синтеза учебного курса  $P_{\text{курс}}$  с минимальными затратами (минимальной продолжительности в часах) сводится к нахождению объединения минимальных по суммарному весу контрапутей, соединяющих вершины целевой компетентности с одной из вершин исходной компетентности. Следует заметить, что достижение всех указанных вершин исходной компетентности не является обязательным.

### **Структура типового учебного модуля коллекции**

Каждый учебный модуль коллекции представлен паспортом с содержанием программы обучения и электронным учебно-методическим комплексом (УМК). Состав УМК и его объем соответствуют видам учебной работы и их трудоемкости, указанным в паспорте программы, и содержит:

- слайд-фильмы в формате ppt, другие иллюстрационные и информационные материалы для лекций,
- учебно-методические пособия и учебники в формате pdf для практических занятий и самостоятельных упражнений,
- список литературы и интернет-ссылок,
- дистрибутивы тренинговых программ для обучения (если это требуется).

Слайд-фильмы для лекций и учебно-методические пособия должны содержать поля для методических указаний (подсказок от автора) преподавателю-тьютору.

### **Заключение**

Проведен анализ предметной области обучения и предложена математическая модель на основе теории графов для управления компетентностью в области ИКТ, учитывающая специфику повышения квалификации кадров и позволяющая автоматизировать синтез модульных учебных курсов с минимизацией их стоимости (продолжительности).

### **Литература**

1. Васильев В.Н., Лисицына Л.С. Разработка и апробация вариативно модульных учебных программ повышения квалификации и профессиональной переподготовки кадров в области информационных и телекоммуникационных технологий для обеспечения и организации учебного процесса. // Сб. научных трудов «Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы в рамках Федеральной целевой программы «Электронная Россия (2002-2010 годы)» на 2004 год», М.: Федеральное агентство по образованию, 2004. Том 1. С.70-81.
2. Васильев В.Н., Лисицына Л.С., Лямин А.В. Методический интернет-центр. СПб.: Питер, 2005. 96 с.: ил.
3. Андерсон Дж. Дискретная математика и комбинаторика: Пер. с англ. М.: Изд. дом «Вильямс», 2004. 960 с.

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСА, НАПРАВЛЕННОГО НА ФОРМИРОВАНИЕ МОТИВАЦИИ ШКОЛЬНИКОВ В ОБЛАСТИ ИЗУЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

**Н.Ф. Гусарова, В.В. Крюков, А.В. Маятин, В.А. Петров, М.А. Петров**

Развитие современных информационных технологий и их внедрение в различные области деятельности человека приводит к значительному повышению спроса на специалистов, чья деятельность в той или иной мере связана с профессиональным использованием информационных технологий. Если рассматривать процесс подготовки таких специалистов в контексте непрерывного образования, становится очевидной важность в этом процессе этапа старшей школы [1]. Именно на этом этапе можно сформировать у школьника устойчивую мотивацию к информационным технологиям как объекту профессиональной деятельности, обеспечить необходимую базу фундаментальных знаний и навыков, осуществить его профессиональную пробу, спроектировать его индивидуальную образовательную траекторию, результатом которой будет собственно квалифицированный специалист в области применения информационных технологий в той или иной предметной области.

Решение всего комплекса этих задач невозможно силами только общеобразовательной школы, хотя развитие теории и методики преподавания школьной информатики позволило разработать содержание и эффективные походы к формированию базовых знаний и умений школьников в этой области [2]. Задачу реализации профессиональной пробы в области информационных технологий можно успешно решать в рамках системы дополнительного образования детей [3]. Но существующие формы организации образовательных процессов оказываются неэффективны в вопросах формирования собственно мотивации к изучению предметной области, а именно этот этап подчас является ключевым для всего последующего процесса профессионального образования.

В условиях отсутствия устойчивой мотивации собственно на изучение предметной области основаниями для выбора высшего учебного заведения и будущей профессии становятся «внепредметные» мотиваторы. Так, в [4] обозначены следующие группы мотивов к обучению студентов в вузах в условиях современной России: «родители велят, чтобы не идти в армию; чтобы после окончания учебы хорошо зарабатывать; чтобы что-то делать и немного развлечься, чтобы освоить выбранную специальность». Эти настораживающие тенденции подтверждаются и в наших исследованиях [5–9] мотивационной структуры учебной деятельности у абитуриентов, студентов и выпускников СПбГУ ИТМО по специальностям и направлениям, связанным с информационными технологиями (510200 – Прикладная математика и информатика, 230201 – Информационные системы и технологии).

Интересно, что с первого взгляда такая ситуация применительно к информационным технологиям выглядит как парадокс. Информационные технологии, как одна из наиболее динамичных областей человеческой деятельности, стали неотъемлемой частью жизни большинства молодых людей. Казалось бы, такое их распространение должно привести к грандиозному росту мотивации на их изучение, вызванной различными факторами: интересом к устройству большого количества компьютеризированных устройств (мобильные телефоны, плееры, собственно персональные компьютеры), осознанием перспектив рынка труда, связанного с информационными технологиями, и др. Тем не менее, опыт общения со школьниками в рамках их дополнительного образования в области компьютерных технологий продемонстрировал, что большинство школьников либо воспринимают компьютер как предмет развлечения или культа, когда на первое место выдвигается собственно функциональность того ли иного устройства, а вопрос принципов его функционирования становится не важным, либо впадают в дру-

гую крайность – ощущение ложного могущества. Интуитивно понятный интерфейс многих современных приложений и отсутствие у школьников возможностей познакомиться с действительно серьезными задачами современных информационных технологий зачастую формируют у них мнение о себе как о «компьютерщике», «сисадмине» и т.п., в действительности сводящееся к умению нажимать ряд последовательностей элементов управления в типовых ситуациях. Третий вариант распространенного восприятия школьником современных информационных технологий сводится к отождествлению их с одним из направлений – программированием. Но, к сожалению, при этом ребенок зачастую не понимает, что, собственно, представляет собой современное программирование, и, выбрав себе будущую профессию на основе определенных стереотипов, впоследствии разочаровывается в ней.

Таким образом, целью нашего исследования явилось проектирование такой формы педагогического воздействия на школьника, которая могла бы привести к формированию у него устойчивой мотивации на изучение информационных технологий, причем не на уровне обычного познавательного интереса, а именно как сферы будущей профессиональной деятельности. При этом формирование мотивации должно происходить в ситуации свободного выбора школьником своего места во всем поле вопросов, решаемых современными информационными технологиями, и с учетом различных вариантов профессиональных образовательных траекторий.

Одним из вариантов решения обозначенной проблемы может явиться специализированный образовательный Интернет-портал. Использование Интернет-ресурсов в качестве средства организации педагогического воздействия на школьников получило широкое распространение в последние годы, что, в частности, связано с включением в сеть Интернет большого числа образовательных учреждений различного уровня образования, в том числе и общеобразовательных школ. Использование Интернет-ресурсов в качестве дополнительных средств при традиционных формах и методах обучения и построение на их основе новых форм и методов педагогического взаимодействия все чаще становится объектом теоретических и прикладных исследований [10]. Тем не менее, эти работы, как правило, исследуют вопросы использования Интернет-ресурсов для предметного обучения в рамках той или иной дисциплины и не затрагивают вопрос формирования мотивации, необходимой для организации этого предметного обучения.

В нашем случае мы воспользуемся такой особенностью Интернет-ресурсов, как формирование вокруг них виртуальных свободных сообществ, субкультур. Это позволяет выбрать в качестве базовой теории для управления поведением пользователей в рамках проектируемого Интернет-портала теорию субкультур [11]. Понятие субкультур (синонимы – общественные движения, неформалы, локальные сети, социальные страты, жизненные стили, малые миры) возникло в связи с исследованиями молодежных движений и обозначает определенную подсистему общества. Субкультуру можно определить как социальную коммуникативную систему, самовоспроизводящуюся во времени и отличающуюся знаковыми и поведенческими признаками. К сети социальных связей, имеющей структуру малого мира, применимы сетевые технологии «массовой мобилизации» [12]: при вбрасывании в такую сеть определенных мобилизующих образов возникает массовая социальная реакция.

Эффективное использование сетевых технологий мобилизации в нашем проекте связано с выполнением двух условий:

- формирование вокруг сайта «малого мира» – детской (подростковой) Интернет-субкультуры;
- создание системы ярких образов, мобилизующих ребенка (подростка) на проявление активности в области информационных технологий и программирования.

Формирование субкультуры подростков, тем более в ситуации on-line ресурса, когда невозможно осуществить адресное воздействие на конкретного участника сообще-

ства и даже узнать о нем какую-либо дополнительную информацию, всегда связано с серьезным риском получить неуправляемую структуру, преследующую цели, не просто не коррелирующие с исходными целями ресурса, но и действующие вопреки этим целям. В связи с этим были проанализированы два типа Интернет-ресурсов, вокруг которых сформировались определенные сетевые сообщества. Один из этих типов – ресурсы, представляющие собственно площадку для общения на любые темы. Примером такого ресурса может служить, например Живой Журнал [13, 14]. Заложенная в основу этого ресурса свобода выбора тем и форм общения привела к формированию субкультуры, основной целью которой является выделение из остального социума. Это можно увидеть хотя бы на появлении жаргона, характерного для этого и подобных ресурсов, основанного на противоречии правилам языка.

Второй тип исследованных нами ресурсов составили узкопрофессиональные ресурсы, посвященные компьютерам и информационным технологиям. Примером такого ресурса может выступить в частности XBit [15]. Пользователи этих ресурсов реализуют с их помощью предметно-направленное общение, направленное на решение конкретных проблем, связанных с компьютерами и информационными технологиями.

Проектируемый нами Интернет-ресурс должен объединить в себе лучшее из рассмотренных выше подходов и при этом, по возможности, избежать «побочных действий», возникающих при образовании неформальных сообществ. В связи с этим на ресурсе были функционально выделены три зоны – профессиональная, личная и образовательная (рис. 1).

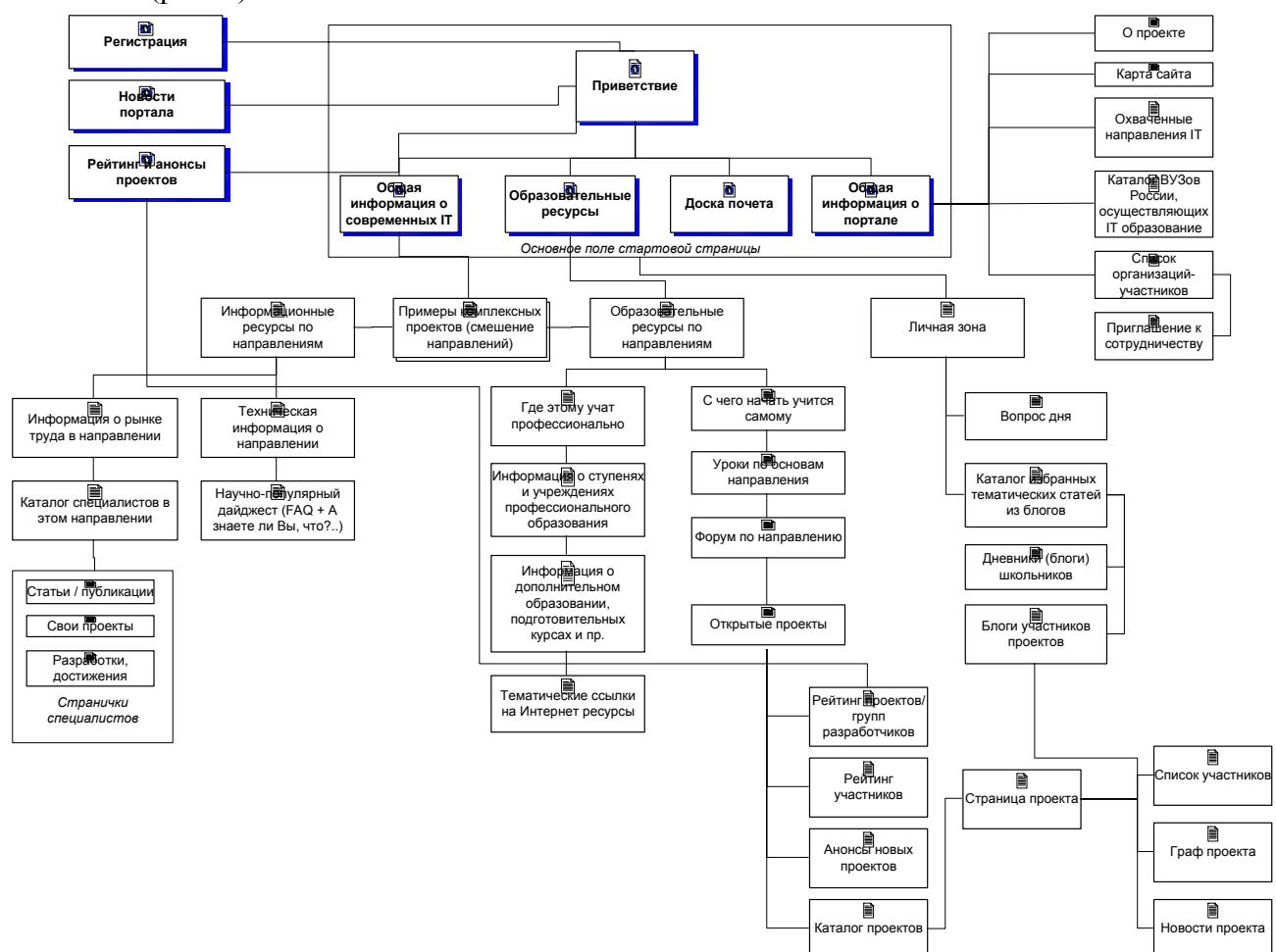


Рис. 1. Функциональная схема ресурса

Если пользователь ресурса уже хорошо мотивирован и заинтересован в первую очередь в новых информационных материалах, посвященных определенным направле-

ниям развития информационных технологий, то ему предоставляется соответствующий набор регулярно обновляемых информационных ресурсов (левая часть схемы рис. 1).

Второй вариант целей пользователя ресурса – решение одной из образовательных задач:

- приобретение новых знаний и навыков в определенной области информационных технологий (on-line уроки);
- профессиональное самоопределение, в частности, через обсуждение своих достижений и неудач с другими школьниками и специалистами (специальные темы форума);
- выбор профессионального образовательного маршрута (материалы по различным ступеням основного и дополнительного образования в определенной области информационных технологий).

Но, независимо от информационной или образовательной доминанты поведения пользователя портала, основной задачей становится формирование для него среды общения – места в Сети, которому он доверяет, где ему становится вначале комфортно, а затем и интересно общаться (правая часть схемы рис. 2). Основными инструментами, позволяющими пользователю осуществлять предметно-направленное общение, являются форумы и блоги.

Форум подразумевает дискуссию по тому или иному вопросу с формированием последовательности мнений, выраженных в виде фрагментов текстов (постов). Для организации комфортного предметного общения форум строится иерархически: в нем выделяются разделы и конкретные темы общения. С педагогической точки зрения важно, чтобы общение на форуме было конструктивным и приводило к решению тех или иных образовательных целей, одновременно исключая маргинальные формы общения. Это достигается модерированием форума, причем мы здесь рассматриваем два типа модераторов. Технические (формальные) модераторы, в отличие от обычных пользователей могут править и удалять сообщение любого пользователя в соответствующей теме/разделе/всем форуме. Одна их задача – исключить из дискуссии оскорбительные или другие неэтичные посты, а в некоторых случаях и просто неконструктивные заявления. Вторая, не менее важная задача – увидеть возможное разделение темы дискуссии на несколько или объединение дискуссий в различных темах и последующее управление иерархической структуры форума. Второй тип модераторов – педагогические (неформальные) модераторы. С формальной точки зрения они являются обычными пользователями. Их задача – заручиться доверием остальных участников форума, чтобы потом через свои посты развивать те или иные идеи: заинтересовывать школьников в определенных областях информационных технологий, подогревать их интерес к соревнованиям, реализуемым на портале и т.п.

Второй важный механизм организации предметного общения школьников в области информационных технологий – блоги. В отличие от форума, блог или сетевой дневник имеет автора, выкладывающего в рамках своего дневника те или иные материалы. Остальные участники ресурса могут просматривать эти материалы и оставлять свои комментарии. Дискуссия, возникающая при обсуждении этих материалов, организуется, как правило, по такому же формату, что и в форуме. Модерирование блогов преследует те же цели, что и у форума и, в принципе, использует те же средства.

Подводя итог, можно сказать, что через создание и поддержку различных механизмов предметно-направленного общения пользователей Интернет-ресурсов формируется «малый мир» таких пользователей, который затем плавно смещается в сторону целенаправленного изучения того или иного направления информационных технологий (средняя часть схемы рис. 2). Реализация такого смещения достигается следующими приемами:

- модерирование всех материалов, выкладываемых пользователями на сайте;

- создание на сайте такого информационного фона (наполнения), который канализирует первичный познавательный интерес ребенка в предметную область информационных технологий.

Еще одним механизмом, не обеспечивающим непосредственное общение пользователей портала, но оказывающим значительное влияние на их мотивацию к изучению информационных технологий, может послужить ежедневная викторина. В нашем случае, проектируя такую викторину, мы исходили из следующих положений:

- викторина должна освещать различные направления информационных технологий;
- викторина должна быть, с одной стороны, посильной среднему школьнику, но, с другой стороны – предоставлять возможность сильному учащемуся продемонстрировать свои знания;
- различные статистики результатов участия в викторине должны быть представлены на информационном ресурсе.

Для этого был разработан специальный модуль информационного ресурса, позволяющий задавать пользователю «Вопрос дня» каждый день по одному из направлений информационных технологий. После текста вопросов школьнику предлагается несколько вариантов ответов, причем среди них может быть несколько правильных. Последнее позволяет, в частности, оценить знания «продвинутых» пользователей, предлагаая, кроме традиционного варианта ответа, более корректную, но менее распространенную формулировку. Результаты ответов на вопросы ежедневной викторины подводятся на «Доске почета». Причем, кроме абсолютного лидера по набранным очкам за все викторины, подводятся итоги еще по нескольким критериям: «Лучший в направлении...», «Самый гармоничный», «Самый активный» и т.п. Кроме того, по решению модераторов на «Доску почета» могут быть выложены выдержки из личных блогов пользователей ресурса или их постов в форумах.

Таким образом, рассмотренные функциональности портала могут послужить основанием для формирования различных образовательных траекторий школьников и решения в рамках этих траекторий различных педагогических задач (рис. 2).

Рассмотренные выше механизмы могут осуществить предметно-направленное общение между пользователями ресурса, только если обеспечить достаточное информационное наполнение, позволяющее пользователям заинтересоваться порталом, прийти на него через поисковые системы и в конечном случае обеспечить почву для последующего предметного общения. Рассматривая вопрос информационного наполнения проектируемого ресурса, мы выделили семь направлений информационных технологий и три общих информационных среза в каждом из них:

- вычислительная техника («железо»);
- прикладная математика/алгоритмическое программирование;
- программирование/проектирование программного обеспечения;
- компьютерная графика;
- WEB-программирование и WEB-дизайн;
- ИТ в бизнесе (корпоративные информационные системы);
- мультимедиа технологии (звук, видео)

Выбор именно такой структуры современных информационных технологий был основан, в первую очередь, на представлениях школьников об областях проектирования и применения компьютерной техники и информационных технологий. Кроме того, такое разделение хорошо коррелирует с перечнем «компьютерных» специальностей, востребованных на современном рынке, хотя и является более конкретизированным [16]. Еще одним основанием такого деления был выбор областей, теоретические основы которых имели бы меньшие пересечения. Это должно повысить узнаваемость проблематики каждой области ребенком и, в конечном счете, повысить эффективность его познавательной деятельности.

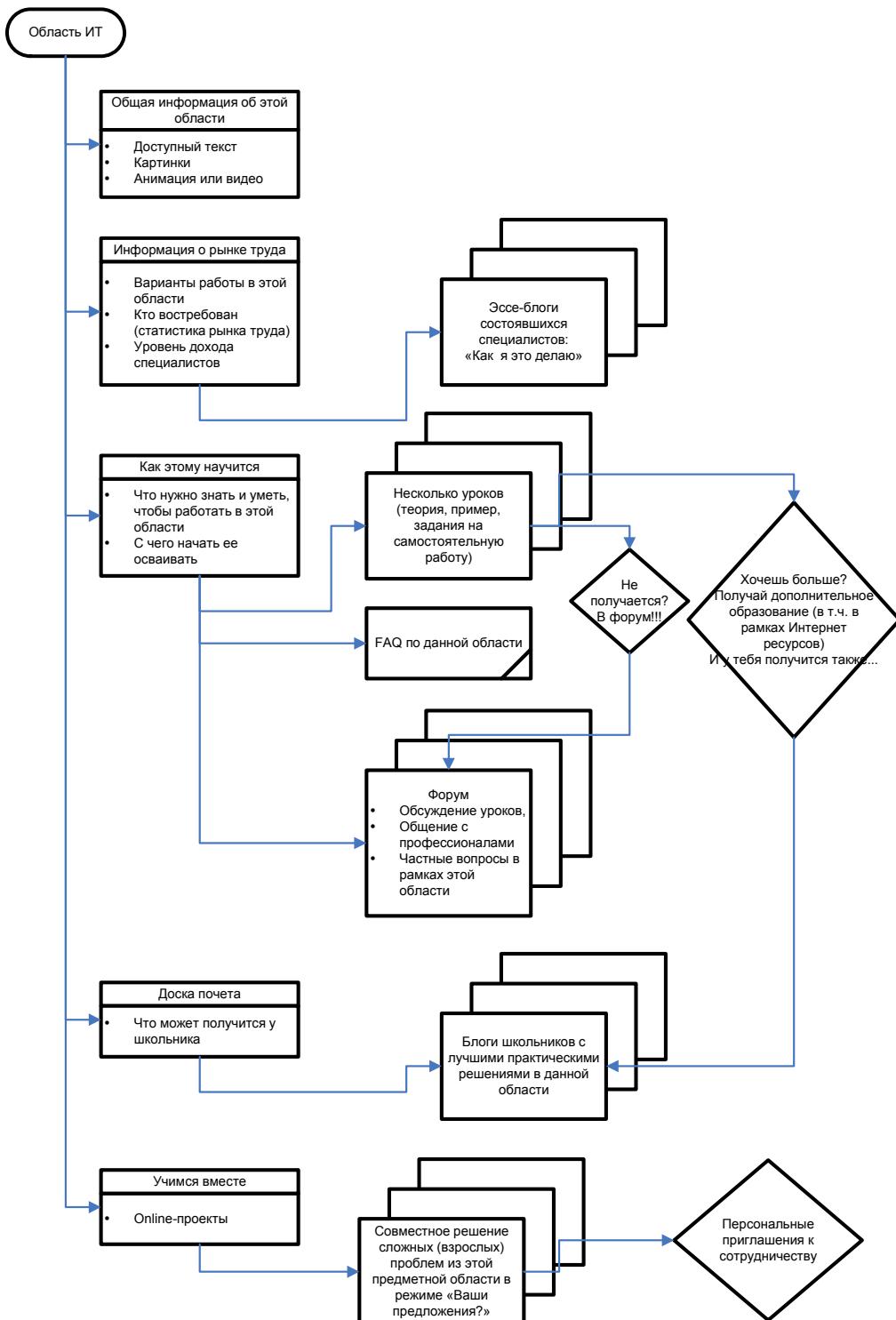


Рис. 2. Вариант образовательной траектории школьника на информационном ресурсе

Для того, чтобы школьник мог не просто ознакомиться с основами каждого направления, но и увидел в их взаимосвязи единую предметную область – информационные технологии, мы предусмотрели обобщающую презентацию, которая на примере создания компьютерной игры демонстрирует взаимосвязь и взаимную необходимость всех направлений современных информационных технологий при реализации сложных ИТ-проектов. Кроме того, в рамках этой презентации, предлагаемой всем школьникам еще до регистрации на портале, будущий пользователь ресурса знакомится также с раз-

личными сервисами портала и узнает об их возможностях в организации его когнитивной и коммуникативной деятельности в рамках ресурса.

Каждое направление предполагает три среза информационных материалов: специальная информация о собственно предметной области, информация о рынке труда и организации профессиональной деятельности, образовательная информация. Задача «предметного» среза – с одной стороны, сформировать у пользователя базовые представления о направлении информационных технологий, а с другой стороны – предоставить ему такую практически ориентированную информацию, которая позволит школьнику решить вопросы, связанные с этим направлением, возникающие в его повседневной жизни. Последний аспект решает, в том числе, и задачу популяризации соответствующего направления.

«Рыночный» срез призван раскрыть перед школьником особенности профессиональной деятельности в рамках каждого направления информационных технологий. Речь здесь идет не только о статистике и рейтингах тех или иных профессий, но и о содержании профессиональной деятельности. В рамках информации на этих срезах представлены эссе / блоги специалистов, профессионально работающих в этом направлении и раскрывающих специфику своей работы на различных уровнях.

Наконец, «образовательный» срез каждого направления информационных технологий помогает школьнику сформировать индивидуальный образовательный маршрут, имеющий конечной целью получение профессии, связанной с этим направлением. Информацию, представленную в этом срезе, можно разделить на две группы. Это собственно учебная информация, например, on-line уроки, библиотеки электронных учебных пособий и информация о ступенях и формах получения профессионального образования. Задача первой группы – это помочь школьнику в профессиональном самоопределении, осуществление его профессиональной пробы в процессе решения типовых задач направления, представленных в уроках. Вторая группа призвана сформировать у школьника осознание необходимости получения профессионального образования в той или иной форме и информационное поле, позволяющее ему выбрать наиболее адекватные формы обучения.

Отдельный, очень важный вопрос, который пришлось решать при собственно реализации готового Интернет-ресурса – его информационная архитектура, т.е. принципы разделения информации на блоки и организация навигации по ресурсу для перехода к каждому блоку. Решая эту задачу, мы опирались на ряд положений, рассмотренных в [17, 18].

Во-первых, это необходимость обеспечения высокого положения в рейтингах поисковиков. Это потребовало внимательно подойти к разбивке информации ресурса на правильные с точки зрения их поиска пользователями блоки и разработку заголовков этих блоков, сочетающуюся с возможными поисковыми выражениями, входящими в сферу интересов ресурса.

Во-вторых, это задача улучшения юзабилити. Ориентация на пользователя – ребенка заставила очень четко определить ключевые элементы навигации и их расположение и реализовать поддержку интуитивно-понятной навигации силами графического дизайна. Отдельное внимание было уделено проектированию дизайна личной зоны, получившей на нашем ресурсе название «личный кабинет», задача которой – обеспечить ощущение стабильной и дружелюбной среды с возможностью ее подстройки под свои пристрастия.

Наконец, третьим вопросом было формирование такой структуры хранения и предъявления информационных материалов, которая не потребовала бы значительного редизайна ресурса в случае появления новых групп материалов или изменения в составе имеющихся. В частности, был реализован механизм выдачи информационных статей, в рамках которого пользователь при входе в раздел видит только их определенное

количество, а затем, по желанию, может перейти к полному списку. При этом Top-list статей формируется на основе коэффициентов приоритетов, позволяющих помещать в «верхний» список как новинки направления, так и наиболее серьезные «классические» статьи или статьи, связанные с вопросами, обсуждаемыми в форуме и т.п.

В настоящее время проводится опробование интернет-ресурса на фокус-группах, репрезентирующих различные целевые аудитории.

## Литература

1. Иванов С.А. Личность в непрерывном образовании. Педагогические условия самореализации личности учащихся в системе непрерывного образования. М.: Редакционно-издательский центр «Школа-Вуз-Академия», 2000. 288 с.
2. Лаптев В.В., Рыжова Н.И., Швецкий М.В. Методическая теория обучения информатике. Аспект фундаментальной подготовки. СПб: Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2003. 352 с.
3. Маятин А.В. Организация допрофессиональной подготовки старшеклассников в области компьютерных технологий в учреждении дополнительного образования детей. Дисс. на соиск. учен. степ. к.п.н.: спец. 13.00.08. Санкт-Петербург, 2005., 194с.
4. Малинецкий Г.В. Учитель, ученик и шанс для России // Компьютера. 2005. № 614. С. 30–36.
5. Аверина В.А., Гусарова Н.Ф. Выбор системы мотивации в профессиональном обучении на базе технологического процесса // Образовательные технологии. Межвуз. сб. научно-метод. статей. Под общ. ред. проф. В.В. Лаптева. СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. С. 49–51.
6. Гусарова Н.Ф., Суровегина Т.А. Структура мотивации обучаемых и ее влияние на качество подготовки специалистов // Труды X Всероссийской научно-методической конференции Телематика'2003. Том 2. С.515-516.
7. Гусарова Н.Ф., Маятин А.В., Петров В.А. Организация профессионального обучения программным продуктам на основе активизации познавательной деятельности обучающихся // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Вып. 9. Подготовка научных кадров: методики, технологии, результаты. СПб: СПб ГИТМО(ТУ), 2003. С.12–16
8. Гусарова Н.Ф., Суровегина Т.В. Исследование индивидуальных факторов успешности студентов при обучении computer science // Научно-технический вестник СПбГИТМО(ТУ). Вып. 9. Подготовка научных кадров: методики, технологии, результаты. СПб: СПбГИТМО(ТУ), 2003. С.17–21
9. Береснев А.Д., Гусарова Н.Ф., Маятин А.В., Петров В.А., Суровегина Т.В. Анализ путей подготовки специалистов высокого уровня в области программирования. // Труды XI Всероссийской научно-методической конференции «Телематика – 2004». Т1. СПб: СПбГУИТМО. С. 347-348
10. Каракозов С.Д., Рыжова Н.И. Методологическая основа проектирования образовательного WEB-портала фундаментальной подготовки в предметной области «Информатика» // Труды конференции «Информационные технологии в науке, образовании, телекоммуникации, бизнесе». Украина, Крым, Ялта-Гурзуф, 20–30 мая, 2002. – Запорожье, Изд-во ЗГУ, 2002. С.288-291.
11. Щепанская Т.Б. Субкультуры / Современный городской фольклор. М.: РГГУ, 2003.
12. Левкович-Маслюк Л. Сети + образы = мобилизация // Компьютерра. №35. 28.09. 2005
13. Проект «Живой Журнал» / [www.livejournal.ru](http://www.livejournal.ru).

14. Экслер А. Живой Журнал // Компьютерра. 2003. №23–24.
15. [www.ixbt.com](http://www.ixbt.com)
16. Советов Б.Я., Цехановский В.В. Информационные технологии. М.: Высшая школа, 2003. 263 с.
17. Alan K'necht. Не экономьте на информационной архитектуре сайта. [www.webmason.ru](http://www.webmason.ru)
18. Тихонов А. Проектирование информационной архитектуры сайта. Курс выживания ТелеКом-Ростов, 2005 год, №22

## НАШИ АВТОРЫ

---

**Акимов Станислав Сергеевич** – ассистент кафедры технологий профессионального обучения.

**Анахин Денис Сергеевич** – студент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Бакаев Дмитрий Григорьевич** – инженер по системам возбуждения ОАО «Электросила».

**Загривный Эдуард Анатольевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электромеханики и электротехники Санкт-Петербургского государственного горного института.

**Бобцова Светлана Владимировна** – аспирантка кафедры технологии приборостроения.

**Бондаренко Игорь Борисович** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования компьютерных систем.

**Борисов Павел Александрович** – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Валетов Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии приборостроения.

**Васильков Дмитрий Витальевич** – доктор технических наук, профессор Санкт-Петербургского института машиностроения.

**Вейко Вадим Павлович** – доктор технических наук, заведующий кафедрой лазерных технологий и экологического приборостроения.

**Вергезова Светлана Михайловна** – аспирантка, ассистент кафедры технологий профессионального обучения.

**Гатчина Юлия Юрьевна** – аспирантка кафедры информатики и прикладной математики.

**Горохов Сергей Львович** – аспирант кафедры физики и техники оптической связи.

**Гурьянов Алексей Валерьевич** – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Гурьянов Валерий Алексеевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Гусарова Наталья Федоровна** – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий профессионального обучения.

**Денисов Константин Михайлович** – старший преподаватель кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Дергунов Андрей Олегович** – аспирант кафедры технологии приборостроения.

**Дульнев Геннадий Николаевич** – доктор технических наук, профессор кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга, директор Центра энергоинформационных технологий.

**Дунаевский Илья Витальевич** – клинический психолог.

**Евлентьева Вера Игоревна** – студентка кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Егоров Сергей Викторович** – аспирант кафедры проектирования компьютерных систем.

**Ерёмин Юрий Валерьевич** – аспирант кафедры технологии приборостроения.

**Жданов Иван Николаевич** – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Зарафьянц Артем Акопович** – аспирант кафедры проектирования компьютерных систем.

**Зелюкин Павел Викторович** – студент кафедры проектирования компьютерных систем.

**Зыонг В.З.** – аспирант кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения.

**Иванов Ганчо Стоянов** – аспирант аспирант кафедры физики и техники оптической связи.

**Иванов Сергей Юрьевич** – кандидат технических наук, старший научный сотрудник НПП «Сигма-Тест».

**Кессель Сергей Владимирович** – магистр математики, аспирант кафедры технологий профессионального обучения.

**Киселев Владислав Борисович** – студент кафедры информатики и прикладной математики.

**Климанов Виталий Александрович** – аспирант кафедры проектирования компьютерных систем.

**Коваленко Максим Николаевич** – студент кафедры информационных систем.

**Копилевич Юрий Исаакович** – кандидат технических наук, доцент кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения.

**Кремнев Дмитрий Валерьевич** – аспирант СПбГТИ(ТУ).

**Кротенко Владимир Владимирович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Крюков Василий Викторович** – студент кафедры физики.

**Куликов Дмитрий Дмитриевич** – доктор технических наук, профессор кафедры технологии приборостроения

**Куприянчик Даниил Викторович** – студент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Лисицына Любовь Сергеевна** – кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой компьютерных образовательных технологий.

**Лукичев Дмитрий Вячеславович** – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Маруева Галина Алексеевна** – студентка СПбГТИ(ТУ).

**Маятин Александр Владимирович** – кандидат педагогических наук, доцент кафедры информационных систем.

**Мирошин Никита Анатольевич** – студент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Мищенко Алексей Владимирович** – аспирант СПбГТИ(ТУ).

**Мурашко Вячеслав Борисович** – инженер кафедры технологии приборостроения.

**Никитина Мария Владимировна** – аспирант кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Овечкина Екатерина Владимировна** – студентка кафедры проектирования компьютерных систем.

**Овчинников Игорь Евгеньевич** – доктор технических наук, профессор кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Огородников Алексей Николаевич** – студент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Панков Алексей Васильевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования компьютерных систем.

**Петров Алексей Александрович** – аспирант кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения.

**Петров Вячеслав Александрович** – аспирант кафедры проектирования компьютерных систем.

**Петров Михаил Андреевич** – студент кафедры информационных систем.

**Пилюгина Юлия Александровна** – аспирантка кафедры проектирования компьютерных систем.

**Попов Артем Аркадьевич** – аспирант кафедры проектирования компьютерных систем.

**Радин Михаил Александрович** – аспирант СПбГТИ(ТУ)

**Сергеева Елена Александровна** – программист Центра дистанционного обучения

**Скворцов Альберт Матвеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования компьютерных систем.

**Слободов Александр Арсеньевич** – доктор химических наук, профессор СПбГТИ(ТУ).

**Смелова Алена Валерьевна** – студентка кафедры проектирования компьютерных систем.

**Соловьев Вячеслав Иванович** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Стражмайстер Ирина Борисовна** – старший преподаватель кафедры компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга, заведующая лабораторией Центра энерго-информационных технологий.

**Сурков Алексей Георгиевич** – аспирант кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения.

**Терещенко Александр Валерьевич** – студент кафедры технологии приборостроения.

**Толмачев Валерий Александрович** – кандидат технических наук, доцент, заместитель заведующего кафедрой электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Томасов Валентин Сергеевич** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехники и прецизионных электромеханических систем,

**Усольцев Александр Анатольевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Успенская Майя Валерьевна** – кандидат технических наук, доцент кафедры физики и техники оптической связи.

**Халецкий Роман Александрович** – ассистент кафедры проектирования компьютерных систем.

**Хромов Игорь Николаевич** – капитан 1 ранга, доцент, начальник учебной части – заместитель начальника ФВО.

**Чернышов Александр Сергеевич** – студент кафедры физики.

**Шашков Михаил Валерьевич** – студент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Шилов Игорь Валерьевич** – студент кафедры информационных систем.

**Яковлев Евгений Борисович** – доктор технических наук, профессор кафедры лазерных технологий и экологического приборостроения.

**Янкин Юрий Юрьевич** – студент кафедры электротехники и прецизионных электромеханических систем.

**Ясырев Алексей Александрович** – студент кафедра проектирования компьютерных систем.

# СОДЕРЖАНИЕ

---

<b>1. ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ .....</b>	<b>3</b>
Дульнев Г.Н., Стражмейстер И.Б., Дунаевский И.В. Оценка познавательных способностей человека по термодинамическим показателям .....	3.
Вергезова С.М., Сергеева Е.А.. Состав и структура электронного учебно-методического комплекса для дисциплины «Концепции современного естествознания».....	9
Хромов И.Н. Воспитание командирских качеств как составная часть формирования педагогического мышления у будущих педагогов профессионального обучения .....	15
Кессель С.В. Анализ литературы по методике подготовки профессиональных консультантов в области информационных технологий.....	21
Сергеева Е.А. Преемственность в изучении компьютерных технологий .....	25
Акимов С.С. Обучение в технологическом образовании основам научных исследований .....	30
<b>2. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>33</b>
Иванов Г.С. Анализ динамических характеристик тремора пользователя.....	33
Успенская М.В. Адсорбирующие композиции на основе тетразолилакрилатных сополимеров и стеклянных наполнителей.....	37
Иванов Г.С.. Обзор методов биометрической идентификации пользователей корпоративной информационной сети.....	41
Слободов А.А., Кремнев Д.В., Радин М.А., В.С. Бабкин, Мищенко А.В. Эффективность методов термодинамического моделирования и расчета фазово-химических превращений в многокомпонентных системах различной природы.....	49
Слободов А.А., Радин М.А., Мищенко А.В., Кремнев Д.В., Маруева Г.А. Проблема достоверности и полноты систем и баз термодинамических свойств веществ .....	54
Горохов С.Л. Волоконно-оптические гироскопы (обзор).....	60
<b>3. ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>68</b>
Петров А.А., Вейко В.П. Применение волоконных микролинз для повышения эффективности оптических межсоединений .....	68
Вейко В.П., Яковлев Е.Б., Зыонг З.В. Экспериментальная установка для лазерной вытяжки нанозондов с обратной связью .....	73
Копилевич Ю.И., Сурков А.Г. О количественной интерпретации импульсных сигналов авиационного океанографического лидара .....	78
<b>4. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА, ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА И ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>85</b>
Борисов П.А., Томасов В.С. Методика выбора способа использования энергии рекуперации в системах электропривода постоянного тока с ШИП .....	85
Никитина М.В., Толмачев В.А. Синтез адаптивной системы управления импульсного источника тока с индуктивно-емкостным фильтром .....	91
Лукичев Д.В., Усольцев А.А. Синтез оптимальной структуры нейросетевых устройств .....	97
Овчинников И.Е., Анахин Д.С. Быстродействующий вентильный двигатель с постоянными магнитами.....	103
Жданов А.Н., Евлентьевна В.И. Информационная подсистема цифрового следящего электропривода.....	111

<b>Денисов К.М., Куприянчик Д.В.</b> Система управления электроприводом азимутальной оси телескопа с фаззи – регулятором .....	116.
<b>Денисов К.М., Янкин Ю.Ю.</b> Контроллер наведения оси телескопа с PCI-интерфейсом .....	122
<b>Толмачев В.А., Никитина М.В., Огородников А.Н.</b> Многомодульное усилительно-преобразовательное устройство электропривода постоянного тока....	127
<b>Гурьянов В.А., Шашков М.В.</b> Тестирующая программа .....	134
<b>Соловьев В.И., Мирошин Н.А.</b> Лаборатория компьютерного моделирования по дисциплине «Электрические и электронные аппараты».....	136
<b>Кротенко В.В., Гурьянов А.В.</b> Параметрический синтез цифровых систем управления с широтно-импульсными преобразователями и эталонными моделями .....	139
<b>Кротенко В.В.</b> Цифровая адаптивная система управления источника тока, построенного на основе транзисторного ШИП.....	149
<b>Бакаев Д.Г., Загривный Э.А.</b> Модель вентильно-индукторного привода аккумуляторного электровоза .....	157
<b>5. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ КОМПЬЮТЕРНЫХ СИСТЕМ..... 162</b>	
<b>Гатчина Ю.Ю.</b> САПР имитационного моделирования дистанционного зондирования водной среды.....	162.
<b>Бондаренко И.Б..</b> Методы оптимизации проектных решений и технология искусственного интеллекта в интегрированных САПР .....	167
<b>Киселев В.Б.</b> Некоторые методы нелинейного анализа .....	172
<b>Егоров С.В.</b> Расчет информационной защищенности комплекса управления подвижными объектами .....	181
<b>Скворцов А.М.</b> Структурирование поверхности монокристаллов кремния в электронной технике.....	186
<b>Скворцов А.М., Халецкий Р.А.</b> Некоторые особенности деградации МОП-структур под действием $\gamma$ -излучения. ....	192
<b>Пилюгина Ю.А., Смелова А.В.</b> Получение периодических структур глубоким анизотропным травлением для опто- и микроэлектронных устройств .....	195
<b>Овечкина Е.В.</b> Технология создания кремниевого композита с активными активированными диэлектрическими свойствами .....	201
<b>Попов А.А.</b> Сравнительный анализ новых криптографических протоколов .....	206
<b>Климанов В.А.</b> Процессинг многомерных кубов в системах OLAP реального времени .....	214
<b>Зарафьянц А.А.</b> Исследование процессов разработки программных систем с использованием MS Project .....	221
<b>Панков А.В., Зелюкин П.В.</b> Автоматизированная сервисного обслуживания систем очистки воды.....	226
<b>Панков А.В., Ясыров А.А.</b> Автоматизация проектирования систем очистки воды.....	229
<b>Лобанцев А.В., Гурков А.Л.</b> Организация виртуального секретного канала связи .....	233
<b>Гатчин Ю.А., Бондаренко И.Б.</b> Методология проектирования технологических систем на основе оптимизации проектных процедур.....	238
<b>Гусарова Н.Ф., Коваленко М.Н., Маятин А.В., Петров В.А., Шилов И.В.</b> Использование иерархически организованного текстового форума как средства online поддержки научно-технического проектирования.....	243

<b>Чернышов А.С., Маятин А.В., Гусарова Н.Ф.</b> Система поддержки принятия решения для предметной области «Полиграфия» на примере настольной издательской системы «InDesign» .....	248
<b>Гусарова Н.Ф., Маятин А.В., Шилов И.В.</b> Каталогизация слабо структурированных информационных объектов с поддержкой многоконтекстного поиска .....	252
<b>6. ТЕХНОЛОГИИ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ .....</b>	<b>255</b>
<b>Куликов Д.Д.</b> Применение UP для проектирования подсистем ТПП.....	255
<b>Дергунов А.О.</b> Организация удаленной базы данных технологического назначения.....	262
<b>Валетов В.А.</b> Аппаратура СИТОН неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния в металлах и сплавах и ее эффективное применение .....	265
<b>Бобцова С.В.</b> Использование RP-технологий в приборостроении.....	270
<b>Еремин Ю.В.</b> Использование адаптивно-селективной технологии для сборки микрообъективов .....	274
<b>Терещенко А.В.</b> Непараметрический подход к оценке микрогеометрии поверхностей и его воплощение при помощи современной компьютерной математики.....	279
<b>Мурашко В.Б.</b> Алгоритмы передачи информации студентам по дисциплине «Основы ТПС» .....	285
<b>7. НОВЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ .....</b>	<b>289</b>
<b>Лисицына Л.С.</b> Модель управления компетентностью в области ИКТ для синтеза модульных учебных курсов повышения квалификации и переподготовки кадров ..	289
<b>Гусарова Н.Ф., Крюков В.В., Маятин А.В., Петров В.А., Петров М.А.</b> Проектирование информационного Интернет-ресурса, направленного на формирование мотивации школьников в области изучения информационных технологий .....	294
<b>НАШИ АВТОРЫ.....</b>	<b>303</b>

**Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО.** Выпуск 20.  
Современные технологические решения / Главный редактор д.т.н., проф.  
В.Н. Васильев. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. 310 с.

**НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК СПбГУ ИТМО**  
**Выпуск 20**

**Современные технологические решения**

Главный редактор  
доктор технических наук, профессор  
В.Н. Васильев

Редакционно-издательский отдел СПбГУ ИТМО

Зав. РИО Н.Ф. Гусарова  
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.  
Подписано в печать 20.12.04.  
Заказ 886. Тираж 100 экз.