



# АВТОМАТИКА И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ



НОВОСИБИРСКИЙ ИНСТИТУТ  
ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ



Ростех



Ростехнологии  
Росэлектроника

2014 № 1 (7)



**Главный редактор д.т.н., доцент В.А. Жмудь**, заведующий кафедрой автоматике  
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ),  
зам. директора ОАО «Новосибирский институт программных систем» (НИПС), **Россия**  
**Ответственный секретарь д.т.н., доцент Г.А. Французова**, НГТУ, **Россия**

**Редакционная коллегия:**

<b>Александр Валерьевич Ляпидевский</b>	Директор ОАО «Новосибирский институт программных систем» (ОАО «НИПС»), к.э.н., <b>Россия</b>
<b>Анатолий Сергеевич Востриков</b>	Профессор кафедры Автоматики НГТУ, д.т.н., Заслуженный преподаватель РФ, академик МАН ВШ, <b>Россия</b>
<b>Владимир Иванович Гужов</b>	Профессор кафедры Вычислительной техники Новосибирский государственный технический университет, <b>Россия</b>
<b>Shiva S. Mahapatra</b>	Professor in the Department of Mechanical Engineering, NIT Rourkela, <b>India</b>
<b>Hubert Roth</b>	Head of the Department of Automatic Control Engineering of University if Siegen, Professor, <b>Germany</b>
<b>You Bo</b>	Director of Institute of Robotics and Automation Technology, Dean of School of Automation, Professor, Harbin University of Science and Technology, <b>China</b>
<b>Любомир Ванков Димитров</b>	Декан машиностроительного факультета Технического университета Софии, доктор, профессор, <b>Болгария</b>
<b>Ярослав Носек</b>	Профессор факультета мехатроники, информатики и междисциплинарного образования Технического университета г. Люберец, доктор, <b>Чехия</b>
<b>Неъматжон Рахимович Рахимов</b>	Руководитель лаборатории Оптоэлектронного метода неразрушающего контроля» СГГА., профессор, д.т.н., <b>Россия, Узбекистан</b>
<b>Геннадий Павлович Цапко</b>	Заведующий кафедрой автоматике и компьютерных систем Национального исследовательского Томского политехнического университета (НИТПУ), директор Научно-образовательного центра CALS-технологий, профессор, д.т.н., академик Международной академии информатизации, <b>Россия</b>
<b>Александр Максимович Малышенко</b>	Профессор кафедры интегрированных компьютерных систем управления НИТПУ, д.т.н., <b>Россия</b>
<b>Василий Васильевич Губарев</b>	Заведующий кафедрой Вычислительной техники НГТУ, профессор, д.т.н., Заслуженный деятель науки, Заслуженный работник высшей школы РФ, академик РАЕН, академик МАИ, <b>Россия</b>

<b>Александр Александрович Воевода</b>	Профессор кафедры Автоматики НГТУ, д.т.н., академик МАН ВШ, <b>Россия</b>
<b>Вадим Яковлевич Копп</b>	Заведующий кафедрой автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета, Заслуженный деятель науки и техники Украины, д.т.н., профессор, <b>Украина</b>
<b>Евгений Владимирович Рабинович</b>	Профессор кафедры Вычислительной техники НГТУ, д.т.н., профессор, <b>Россия</b>
<b>Михаил Геннадьевич Гриф</b>	Заведующий кафедрой Автоматизированных систем управления НГТУ, д.т.н., профессор, <b>Россия</b>
<b>Vimal J. Savsani</b>	Associate Professor at V. N. Gardi college of engineering and technology, Surat, <b>India</b>
<b>Борис Дмитриевич Борисов</b>	Заведующий лабораторией Института Лазерной физики СО РАН (ИЛФ СО РАН), д.т.н., <b>Россия</b>
<b>Сергей Леонидович Миньков</b>	Заведующий кафедрой информационного обеспечения инновационной деятельности Национального исследовательского университета «Томский государственный университет», к.ф.-м.н, ст.н.сотр., чл.-корр. МАИ, <b>Россия</b>
<b>Борис Викторович Поллер</b>	Заведующий лабораторией Института Лазерной физики СО РАН (ИЛФ СО РАН), д.т.н., <b>Россия</b>
<b>Татьяна Владимировна Авдеенко</b>	Заведующий кафедрой Экономической информатики НГТУ, профессор, д.т.н., <b>Россия</b>
<b>Баярын Бат-Эрдэнэ</b>	Заместитель директора по научным исследованиям и инновациям Энергетического Института Монгольского государственного университета науки и технологии, к.т.н. асс. профессор. <b>Монголия</b>
<b>Анатолий Михайлович Корилов</b>	Зав. кафедрой автоматизированных систем управления и радиоэлектроники ТУСУРа, профессор, д.т.н., акад. МАН ВШ, специалист в области системного анализа и ТАУ. <b>Россия</b>
<b>Виталий Сергеевич Щербаков</b>	Декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника», д.т.н., профессор СибАДИ, Омск, <b>Россия</b>
<b>Алексей Александрович Руппель</b>	И.о. зак. каф. АПП и Э, к.т.н., доцент СибАДИ, Омск, <b>Россия</b>
<b>Сэнгэ Самбуевич Ямпиров</b>	Профессор каф. «Биомедицинская техника» ПАПП, д.т.н., Улан-Удэ, <b>Россия</b>
<b>Владимир Иванович</b>	Руководитель лаборатории ОАО «НИПС», к.т.н., <b>Россия</b>

**Гололобов**

**Михаил Витальевич Калинин** Руководитель отдела ОАО «НИПС», **Россия**

**Константин Витальевич Змеу** Доцент, к.т.н., Заведующий кафедрой Технологий промышленного производства, Инженерной школы Федерального дальневосточного университета, Владивосток, **Россия**

УДК 681.2; 681.3; 681.5; 681.7

**Учредитель журнала:**

Открытое акционерное общество «Новосибирский институт программных систем»

Сайт организации: [www.nips.ru](http://www.nips.ru)

Свид. о регистрации ПИ № ФС77-55079

**Адрес редакции:**

630090, Россия, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 6/1,  
ОАО «НИПС», заместителю директора по науке

e-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

web: <http://ait.cs.nstu.ru/content/ape>

Подписано в печать 30 апреля 2014 г.

## Оглавление

<b>I. Автоматика. Автоматизированные системы.</b> .....	<b>7</b>
Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети: удаленный сетевой доступ .....	9
Метод регулирования процессом теплоотдачи в конденсаторе холодильной установки	13
Модифицированный ПИД-регулятор .....	20
Адаптивная система регулирования температуры теплообменника.....	24
<b>II. Робототехника. Программные средства и системы. Свободное программное обеспечение.</b>	
<b>Открытое программное обеспечение.....</b>	<b>27</b>
Программный комплекс нечетко-детерминированного моделирования гидрогеологических объектов .....	29
Интегрированная электронная медицинская карта ребенка .....	35
Программное обеспечение для определения индексов каузальности линейных вход-выходных динамических систем .....	40
<b>III. Инновационные технологии. Перспективные технологии. Моделирование систем. Численная оптимизация.</b> .....	<b>51</b>
Предметная параметризация виртуальных манекенов.....	53
Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упредителя Смита .....	57
Процессы формирования наноструктур при осаждении кластеров на поверхность кристаллов с помощью компьютерного моделирования .....	68
Эффективность полноты ПИД-регулятора при управлении многоканальным объектом .....	76
<b>IV. Измерительные средства и системы</b> .....	<b>80</b>
Автоматизация процесса градуировки шкал манометров.....	82
<b>V. Популярные статьи. Введение в специальность.</b> .....	<b>93</b>
Использование сети интернет для интерактивной лабораторной работы с дистанционным управлением моделью робота снегоуборщика .....	95
Прецизионные измерения частоты для аттестации частотных стандартов.....	104
Что такое АФН-эффект .....	120
<b>VI. Дискуссии. Форум. К сведению авторов.</b> .....	<b>125</b>
Теорема Котельникова-Найквиста-Шеннона, Принцип Неопределенности и Скорость света.....	127
Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия».....	137
Content .....	140

# **I. Автоматика. Автоматизированные системы.**

## Содержание раздела:

- Е. А. Басыня, Г.А. Французова, А.В. Гунько. Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети: удаленный сетевой доступ. (НГТУ, Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 9–12.
- В.И. Гужов, И.А. Сажин, А.И. Сажин, В.А. Шумейко. Метод регулирования процессом теплоотдачи в конденсаторе холодильной установки. (НГТУ, Новосибирск, Россия). 2014. № 1 (7). С. 13–19.
- М.В. Скороспешкин, В.Н. Скороспешкин, Г.П. Цапко. Модифицированный ПИД-регулятор. ФГБОУ ВПО НИ ТПУ. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 20–23.
- М.В. Скороспешкин, В.Н. Скороспешкин, Г.П. Цапко. Адаптивная система регулирования температуры теплообменника. ФГБОУ ВПО НИ ТПУ. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 24–26.

# Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети: удаленный сетевой доступ

*Е. А. Басыня, Г.А. Французова, А.В. Гунько  
НГТУ (Новосибирск, Россия)*

**Аннотация.** В данной статье рассмотрена успешная реализация механизма удаленного сетевого доступа к самоорганизующейся системе управления трафиком вычислительной сети, функционирующей на основе методов противодействия сетевым угрозам и обеспечения конфиденциальности информационных потоков корпоративной сети.

**Ключевые слова:** удаленный сетевой доступ, механизмы сканирования и зондирования, самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети.

## I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день одним из приоритетных направлений развития сектора информационно-коммуникационных технологий (ИКТ) является обеспечение информационной безопасности. Государственные учреждения и частные предприятия организуют локальные вычислительные сети с коммутацией пакетов на базе стека протоколов TCP/IP. Уязвимость данного стека и запрограммированная «жесткая» логика различных аппаратно-программных средств управления и защиты трафика обуславливают необходимость сопровождения сектора ИКТ предприятия квалифицированными техническими специалистами [4]. Для повышения уровня информационной безопасности и автоматизации данного процесса была разработана самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети (ССУ) [7]. В ее основу были заложены авторские методы противодействия сетевым угрозам и обеспечения конфиденциальности информационных потоков корпоративной сети [6,7]. Необходимость организации удаленного сетевого доступа к разработанной информационной системе из любой точки мира – задача нетривиальная. Обусловлено это высоким приоритетом информационной безопасности и функционированием механизмов ССУ по фальсификации серверных решений и динамической самоорганизации межсетевых экранов [8].

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является выбор методов реализации системы удаленного сетевого доступа

к самоорганизующейся системе управления трафиком вычислительной сети, функционирующей на основе методов противодействия сетевым угрозам и обеспечения конфиденциальности информационных потоков ИКТ предприятия.

## III. ТЕОРИЯ

Первый этап обеспечения информационной безопасности локальной вычислительной сети и ее взаимодействие с глобальной сетью Интернет осуществляются посредством межсетевых экранов с использованием технологии NAT (от англ. Network Address Translation — «преобразование сетевых адресов»). Используя трансляцию по месту назначения (механизм Destination NAT) и IP-адрес узла (с которого будет осуществляться удаленный доступ) - можно задать пакетному фильтру шлюза правило разрешения «проброса» соединения на необходимый локальный хост. Достаточно указать глобальный адрес удаленного клиента, протокол и порт, при обращении на который межсетевой экран произведет «проброс» соединения. Однако, в рамках данной задачи необходимо обеспечить доступ с любого IP-адреса, оставив при этом политику по-умолчанию «запрет всех неуказанных соединений». Существует ряд протоколов для удаленной работы:

- RDP (англ. Remote Desktop Protocol — протокол удалённого рабочего стола);
- SSH (англ. Secure Shell — безопасная оболочка);
- RFB (англ. Remote FrameBuffer, удалённый кадровый буфер);
- и др.

Но любые аппаратно-программные средства имеют свои уязвимости (в том числе и современные криптографические протоколы SSL <англ. Secure Sockets Layer — уровень защищённых сокетов> и TLS <англ. Transport Layer Security — безопасность транспортного уровня>, а соответственно и VPN <англ. Virtual Private Network — виртуальная частная сеть>) и могут быть взломаны/дешифрованы при определенных вычислительных и временных затратах [1,3]. К примеру, проприетарный протокол RDP корпорации Microsoft имел уязвимость CVE-2012-0002 (RCE в RDP), позволяющую выполнить произвольный код на

удаленной системе при мощи специально сформированного RDP-пакета. Так же стоит отметить уязвимость протокола SSH, работающего в режиме передачи блочного шифра (англ. Cipher Block Chaining, CBC), потенциально предоставляющую возможность восстановить содержимое зашифрованных сессий.

Интересным техническим решением является «простукивание портов» (англ. Port Knocking). В данном методе с IP-адреса «заданного» клиента посылается кодовая последовательность запросов к закрытым портам информационной системы. Сервер принимает запросы, записывает их в журнал регистрации, но не отвечает на них. Специальная утилита просматривает журнал регистрации, и как только находит кодовую серию ошибок доступа, открывает соответствующий комбинации порт на доступ с указанного в последовательности IP-адреса. Данный алгоритм уязвим перед современными средствами сканирования и зондирования [5] (наиболее критично при доступе злоумышленника к каналу связи).

#### IV. МЕТОД УДАЛЕННОГО СЕТЕВОГО ДОСТУПА К ССУ

В основу работы ССУ заложен метод противодействия сетевым угрозам, использующий аппарат генетической алгоритмизации и нечеткой логики, позволяющий при идентификации процессов сканирования и зондирования производить фальсификацию серверных решений и выставление «ловушек» [2] с последующим изучением действий злоумышленника и возможностью самореорганизации.

С учетом вышеописанной структуры системы предлагается использовать метод удаленного сетевого доступа, имеющий в своей основе технологию «простукивания портов», но расширенную алгоритмом динамического формирования последовательности условий предоставления доступа к ССУ.

Клиент-серверная модель для генерации кодовой комбинации использует:

- информацию о предшествующих успешных соединениях (дату, время, флаги пакетов <выборка блоком нечеткой логики>);
- информацию о текущей дате;
- последовательность сгенерированных стохастических параметров (естественно, без генератора псевдослучайных чисел Dual\_EC\_DRBG <Dual Elliptic Curve Deterministic Random Bit Generation>);
- ЭЦП
- и др.

Алгоритм генерации последовательности заложен как в клиентской части, так и в серверной. Совпадение результатов

обеспечивается наличием идентичных начальных данных с ограниченным доступом.

На основе данных параметров, с использованием хэш-функции и нечеткой логики, формируется необходимая последовательность портов и протоколов.

Для составления итоговой последовательности (рис. 1) нечеткая логика включает http-обращения из tor-сети (посредством «луковой» маршрутизации) со списка хостов корпоративного нода.

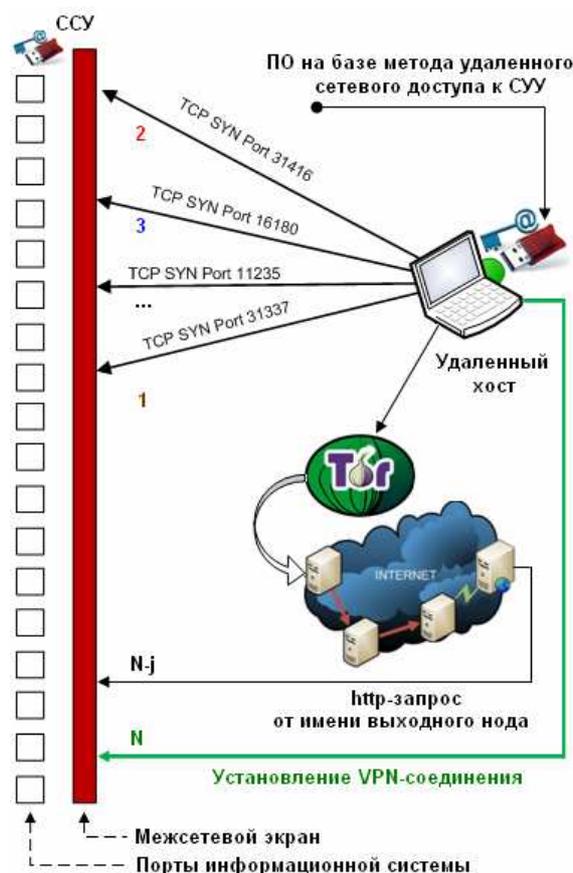


Рис. 1. Общая схема удаленного сетевого доступа к ССУ

После прохождения данной цепочки хосту разрешается установление VPN-соединения и работа через него посредством ранее приведенных криптографических протоколов. Использование оверлейных сетей повышает степень защиты от sniffеров.

#### V. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для сравнительной оценки эффективности разработанного метода в сравнении с классическим «простукиванием портов» было проведено более 500 тестов (при 25 удаленных подключениях) комплексом программ SpyNetBM, IRIS, Net Analyzer, unMilitaryZ, BDUprow и др. Сводный отчет представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Сводный отчет по работе sniffеров

В рамках данного эксперимента, лишь система с классическим методом «простукивания» и цепочкой из 20 шагов оказалась уязвимой в 6% итераций.

## VI. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На практике разработанный метод хорошо себя зарекомендовал: надежно и отказоустойчиво защищает информационную систему и локальную вычислительную сеть предприятия при организации удаленного доступа. Фальсификация серверных решений и выставление «ловушек» ССУ минимизируют информативность результатов работы инструментария сканирования/зондирования. Требования к вычислительным мощностям незначительны. В рамках данного эксперимента главный межсетевой экран ССУ был «развернут» на виртуальной машине гипервизора XEN, задействуя лишь 512 МБ оперативной памяти, 40 ГБ пространства жесткого диска и 1 ГГц вычислительной мощности процессора. Данный шлюз успешно обеспечивал работу 50 хостов корпоративной сети предприятия.

## VII. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод организации удаленного сетевого доступа обеспечивает высокий уровень информационной безопасности, минимизируя информативность результатов работы инструментариев сканирования / зондирования / дешифрования / прогнозирования. В перспективе данный метод может быть заложен в основу проприетарного протокола.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Алферов А. П., Зубов А. К., Кузьмин А.С. Основы криптографии: Учебное пособие. - 2-е изд., испр. и доп. — М.: Гелиос АРВ, 2002. — 480 с
- [2] Басыня Е.А., Гунько А.В. Интеллектуально-

адаптивные методы обеспечения информационной сетевой безопасности // Журнал "Автоматика и программная инженерия". – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. - Выпуск 3. С. 95-97.

- [3] Басыня Е.А., Французова Г.А., Гунько А.В. О перспективах развития криптографии // Перспективное развитие науки, техники и технологий. Материалы III-й Международной научно-практической конференции в 3 томах. – Курск: Изд-во ЮЗГУ, 2013. - Том 1. С. 199-200.
- [4] Гунько А.В., Басыня Е.А. Стохастические методы обеспечения информационной сетевой безопасности // Актуальные проблемы электронного приборостроения. Материалы XI Международной конференции, – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. - Том 7. С. 47-49.
- [5] Крис Касперски. Техника сетевых атак - М.: СОЛОН-Р, 2001 - 400 с.
- [6] Французова Г.А., Гунько А.В., Басыня Е.А. Обеспечение информационной безопасности внутренних информационных потоков корпоративной сети // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – Часть 2. - С. 41-43.
- [7] Французова Г.А., Гунько А.В., Басыня Е.А. Разработка и исследование самоорганизующейся системы управления трафиком вычислительной сети // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 10 ч. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2013. – Часть 2. - С. 3-7.
- [8] Французова Г.А., Гунько А.В., Басыня Е.А. Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети: механизмы защиты от сканирования и зондирования // Материалы международной научно-практической конференции SWorld «Перспективные инновации в науке, образовании, производстве и транспорте»: тезисы докл. Междунар. конф.– URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-413/informatics-computer-science-and-automation-413/20781-413-0194.html> (дата обращения: 16.01.2014) - 4130194



**Басыня Евгений Александрович**, аспирант кафедры автоматизации НГТУ. Основное направление научных исследований: управление и информационная безопасность в ВС. Имеет более 15 публ. [basinya@mail.ru](mailto:basinya@mail.ru)



**Французова Галина Александровна**, д. т. н., профессор кафедры автоматизации НГТУ. Основное направление научных исследований: синтез систем экстремального регулирования. Имеет более 100 публикаций. [frants@ac.cs.nstu.ru](mailto:frants@ac.cs.nstu.ru)



Гулько Андрей Васильевич, к. т. н., доцент кафедры автоматики НГТУ. Основное направление научных исследований: разработка автоматизированных систем сбора и обработки результатов. Имеет более 60 публикаций.  
[gun@ait.cs.nstu.ru](mailto:gun@ait.cs.nstu.ru)

## **Self-Organizing System of Traffic Control of Computer Net: Remote Net Access**

Evgeny BASINYA, Galina FRANTSUZOVA,  
Andrey GUNKO

*Abstract:* The paper discusses successful realization of algorithm of remote net access to self-organizing system of traffic control for computing net functioning on the base of the methods of resistance of net treats and providing of confidentiality of information flows of corporative net.

*Key Words:* Remote net access, Algorithms of Scanning and Reconnaissance, Self-Organizing System of Traffic Control for Computing Net.

# Метод регулирования процессом теплоотдачи в конденсаторе холодильной установки

*В.И. Гужов, И.А. Сажин, А.И. Сажин, В.А. Шумейко.*

*Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия*

**Аннотация:** В данной работе определены параметры управления двухфазным состоянием хладагента в конденсаторе реальной холодильной установки. Разработана система автоматического регулирования процессом теплоотдачи для повышения эффективности холодильной машины в целом.

**Ключевые слова** Конденсатор, хладагент, система автоматического управления.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Системы автоматического регулирования работы отдельных агрегатов позволяют снизить энергозатраты, повысить эффективность холодильных машин. В конструкциях современных парокомпрессионных теплообменных установок отражены последние технологические разработки, компьютерные системы регулирования и контроля параметрами энергозатрат, внедрены наиболее эффективные, экологически безопасные хладагенты [2–4]. Теплофизические процессы, происходящие с рабочим телом в холодильных машинах, отражены в виде графиков-циклов, например, в координатах  $\lg P-i$  ( $P$  - давление,  $i$  - энтальпия) [1, 5, 6]. Модернизация теплообменных устройств связана с оптимизацией реальных циклов, подбором отдельных агрегатов, отвечающих расчетным параметрам. Таким образом, существенно улучшены характеристики компрессоров, дросселирующих устройств, испарителя и др. С другой стороны, хорошо изучены течения двухфазных сред [1, 5–8, 16]. В настоящее время проведены многочисленные экспериментальные исследования и построены математические модели движения, процессов теплоотдачи газожидкостных потоков в условиях естественной, вынужденной конвекции, наличия вихревых эффектов, в том числе при внедрении в поток смеси наночастиц [1, 5–13]. Ряд методик из этого кластера исследований может быть применен для достоверного определения параметров двухфазного потока хладагента в конденсаторе парокомпрессионной холодильной установки. Например, газосодержание, потери давления, режим течения можно определить

электроконтактным методом, методами акустического или оптического зондирования [7, 17, 18]. Методики Кутателадзе – Сорокина, Бейкера позволяют практически достоверно определить режим течения рабочего тела в любом сечении испарителя и конденсатора теплообменного аппарата [1–3, 5, 6, 17]. Следовательно, принципиально возможно реализовать механизм регулирования режимами течения газожидкостного потока. Методики синтеза систем автоматического регулирования работой гидравлических аппаратов, теплообменных устройств широко применяются на практике [2, 3, 20–22]. Эффективность системы автоматического регулирования в целом существенно зависит от достоверности сформированного управления. Следуя [1–3, 5, 6, 17], достаточно оперировать с ограниченным числом теплофизических параметров двухфазного потока. Как правило, принципиально важно сформировать передаточную функцию исполнительного устройства. В конденсаторе парокомпрессионной холодильной установки расширение участка кольцевого режима течения связано с процессом формирования жидкой пленки определенной толщины, следовательно, математической моделью исполнительного блока является интегрирующее аperiodическое звено со свойством пропорциональности [20].

В данной работе выполнен анализ реального цикла теплообменного аппарата. Определены величины теплофизических параметров, характеризующих хладагент в реальной холодильной установке. Применены методики Кутателадзе–Сорокина и Бейкера для расчета процесса теплоотдачи в разных сечениях трубы конденсатора. Доказана возможность увеличения эффективности холодильной установки в целом. Разработана система автоматического управления процессом теплоотдачи в конденсаторе парокомпрессионной холодильной установки. Проведен расчет математической модели исполнительного устройства как интегрирующего аperiodического звена со свойством пропорциональности. Выполнен численный анализ передаточной функции.

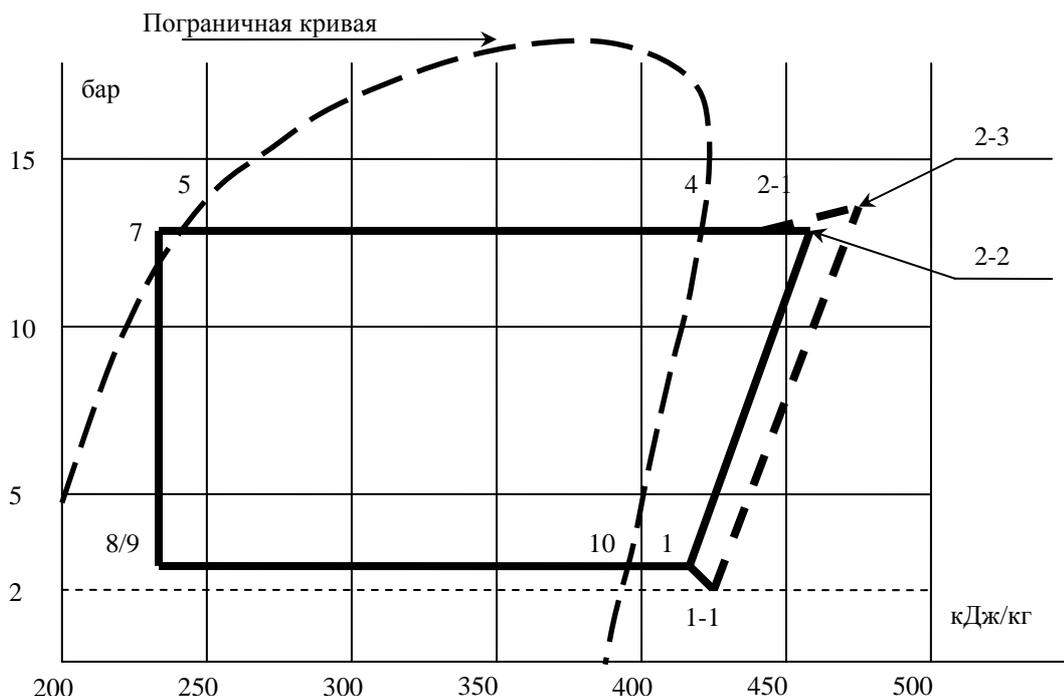


Рис.1. Цикл холодильной установки

## II. КАРТЫ РЕЖИМОВ ТЕЧЕНИЯ

В качестве примера, который не уменьшает общность рассуждений, рассмотрен реальный цикл парокompрессионной холодильной установки в координатах  $\lg P - i$  ( $P$  - давление,  $i$  - энтальпия) [2] (рис. 1). Пояснения по работе холодильной машины, отображенной в виде цикла в координатах «энтальпия – давление» (рис. 1). Пограничная кривая (подковообразная пунктирная линия) разделяет жидкое, смешанное и состояние перегретого пара хладагента.

Состояние 1 (точка 1) соответствует всасывающему трубопроводу компрессора.

Состояние 2 (точка 2-1) соответствует нагнетательной магистрали компрессора. На практике наблюдается деформация цикла холодильной машины (точки 1-1, 2-2, 2-3), вызванная перегревом хладагента в компрессоре, потерями давления на нагнетательной и всасывающей магистралях. Состояние 4 (точка 4) – вход в конденсатор. Состояние 5 (точка 5) – выход из конденсатора. Состояние 7 (точка 7) – вход в регулирующий вентиль (начало процесса дросселирования хладагента). Состояние 8-9 (точка 8/9) – выход из регулирующего вентиля (давление и температура рабочего тела уменьшаются) и вход в испаритель. Состояние 10 (точка 10) – выход из испарителя. Массовый расход при холодопроизводительности  $32 \text{ кВт}$  равен  $G_{R22} = 0,179 \text{ кг/с}$ . Площадь сечения трубы конденсатора диаметром  $D = 0,025 \text{ м}$  составляет  $S_0 = 4,909 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ . В точке 4 цикла [2], соответствующей началу процесса конденсации, температура хладагента R22 равна  $T_4 = 303 \text{ К}$ , давление  $P_4 = 11,92 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Сплошная линия

диаграммы цикла, соответствующая процессу конденсации [2], условно разделена на десять участков для анализа состояния газожидкостного потока хладагента. Газосодержание ( $X_{ГАЗ}$ ) изменяется от 1 (точка 4) до 0 (точка 5) с шагом 0,1. Исключение составляет промежуточная точка в первом участке. Здесь газосодержание равно  $X_{ГАЗ} = 0,95$ . Расчетные значения критической температуры ( $T_{4К}$ ), коэффициента поверхностного натяжения ( $\sigma_{T_4}$ ), удельного объема газовой фазы ( $v_4$ ), плотности газовой фазы  $\rho_4$  приняты в соответствии с параметрами состояния смеси [4]. Плотность и коэффициент динамической вязкости жидкой фазы R22 вычислены по следующим соотношениям (1), (2) приведенным в [4].

При моделировании процесса конденсации рабочего тела применяются карты течения газожидкостных потоков. Методики Кутателадзе–Сорокина [1], Бегга и Брилла [7], а также Бейкера [6] позволяют достоверно определить режим течения двухфазной среды в зависимости от конкретных параметров хладагента и геометрии трубопровода. Карта течений газожидкостных систем Кутателадзе–Сорокина соответствует экспериментальным и расчетным данным [1–3, 17].

Применение карты течений Бегга и Брилла позволяет определить структуру газожидкостного потока в средней части конденсатора.

Карта течений газожидкостных систем Кутателадзе–Сорокина построена в координатах комплексов  $K - N$  [1], при вычислении которых необходимо знать (или задать) параметры

двухфазного потока (приведенные скорости фаз, их плотности, коэффициент поверхностного натяжения в определенном сечении конденсатора). Рассмотрены два случая возможных комбинаций режимов течения хладагента в конденсаторе. Первый случай -

наличие постоянной области кольцевого режима течения (не более двух третей от общей длины трубопровода конденсатора), и второй случай - когда в конденсаторе существенно увеличена область кольцевого режима течения двухфазной среды (более 70% от общей длины).

$$\rho_{L4} = 4963 + 1.93578 \cdot (369.28 - T_{4K}) + 173.975 \cdot (369.28 - T_{4K})^{\frac{1}{3}} - 0.002 \cdot (369.28 - T_{4K})^2 - 17.867 \cdot (369.28 - T_{4K})^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

$$\mu_{T4} = 10^{-6} \cdot [23.6136 - 9.5414 \cdot \tau_{T4} + 1.67446 \cdot \tau_{T4}^2] \cdot (\tau_{T4})^{0.5}, \quad (2)$$

где  $\tau_{T4} = T_{4K} / T_4$ .

Значения величин плотностей из [2], [3] соответствуют значениям, полученным в (1), (2).

Ниже рассмотрен пример применения комплексов Кутателадзе-Сорокина к определению вида течения газожидкостного потока. Следуя [1], приведенные скорости фаз вычисляются следующим образом (для газовой и жидкой, соответственно):

$$W_{GAS4} = \frac{G_{R22} \cdot X_{GA3}}{\rho_4 \cdot S_4};$$

$$W_{ЖИД4} = \frac{G_{R22} \cdot (1 - X_{GA3})}{\rho_{L4} \cdot S_0}. \quad (3)$$

Комплексы Кутателадзе-Сорокина имеют вид:

$$K = \left( \frac{g \cdot (\rho_{L4} - \rho_4)}{\rho_4^2 \cdot \sigma_{T4}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot W_{GAS4}, \quad (4)$$

$$N = \frac{1}{4} \cdot \left( \frac{(\rho_{L4} - \rho_4)^4 \cdot \sigma_{T4}^2}{\rho_{L4}^2 \cdot g^5 \cdot D^6} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( 1 + 31 \cdot g \frac{\sigma_{T4}^{\frac{3}{2}}}{\rho_4} \cdot \left( \frac{\rho_{L4}}{(\rho_{L4} - \rho_4)} \right)^{0.55} \right) \cdot W_{ЖИД4}, \quad (5)$$

где  $g$  - ускорение свободного падения. На рис. 2 отмечены расчетные точки в координатах комплексов Кутателадзе-Сорокина.

Следуя [2-4, 16] изменение газосодержания по мере прохождения конденсатора от точки 4 до точки 5 носит параболический закон. Полученные значения комплексов позволяют определить координаты точек на карте течений Кутателадзе-Сорокина [1], соответствующие дисперсному режиму течения при газосодержании 0.9 - 0.7, дисперсно-кольцевому - 0.7 - 0.1 и 1.0 - 0.09 - пограничному состоянию ближе к снарядному режиму течения.

Карта течений Беггза и Брилла [7] также показывает наличие разных режимов течения. Соответствующие этой методике комплексы вычисляются следующим образом:

$$\lambda_{B1} = \frac{\rho_4 (1 - X_{GA3})}{\rho_{L4} \cdot X_{GA3} + \rho_4 (1 - X_{GA3})}, \quad (6)$$

$$L_{B1} = 316 \cdot \lambda_{B1}^{0.302}, \quad L_{B2} = 0.000925 \cdot \lambda_{B1}^{-2.468}, \quad (7)$$

$$L_{B3} = 0.1 \cdot \lambda_{B1}^{-1.452}.$$

Число Фруда в данном случае принято в виде:

$$Fr = \frac{W_{\Sigma LG}^2}{g \cdot D}, \quad (8)$$

где  $W_{\Sigma LG}$  - сумма приведенных скоростей фаз

$$W_{\Sigma LG} = W_{GAS4} + W_{ЖИД4}. \quad (9)$$

Таблица 1. Значения комплексов Кутателадзе - Сорокина

$X_{GA3}$	0,1	0,3	0,5	0,6	0,7	0,95
$K$	1,701	5,103	8,505	10,206	11,907	16,160
$N$	11,984	10,486	7,490	5,992	4,494	0,749

Для относительного массового газосодержания  $X_{X4} = 0,7$  число Фруда  $Fr$  больше  $L_{B1}$  и параметр  $\lambda_{B1}$  меньше 0.4, что означает наличие кольцевого режима течения.

На интервале  $0,6 < X_{X4} < 0,2$  число Фруда  $L_{B3} < Fr < L_{B1}$  и параметр  $0,01 < \lambda_{B1} < 0,4$  - пробковый либо снарядный режим течения.

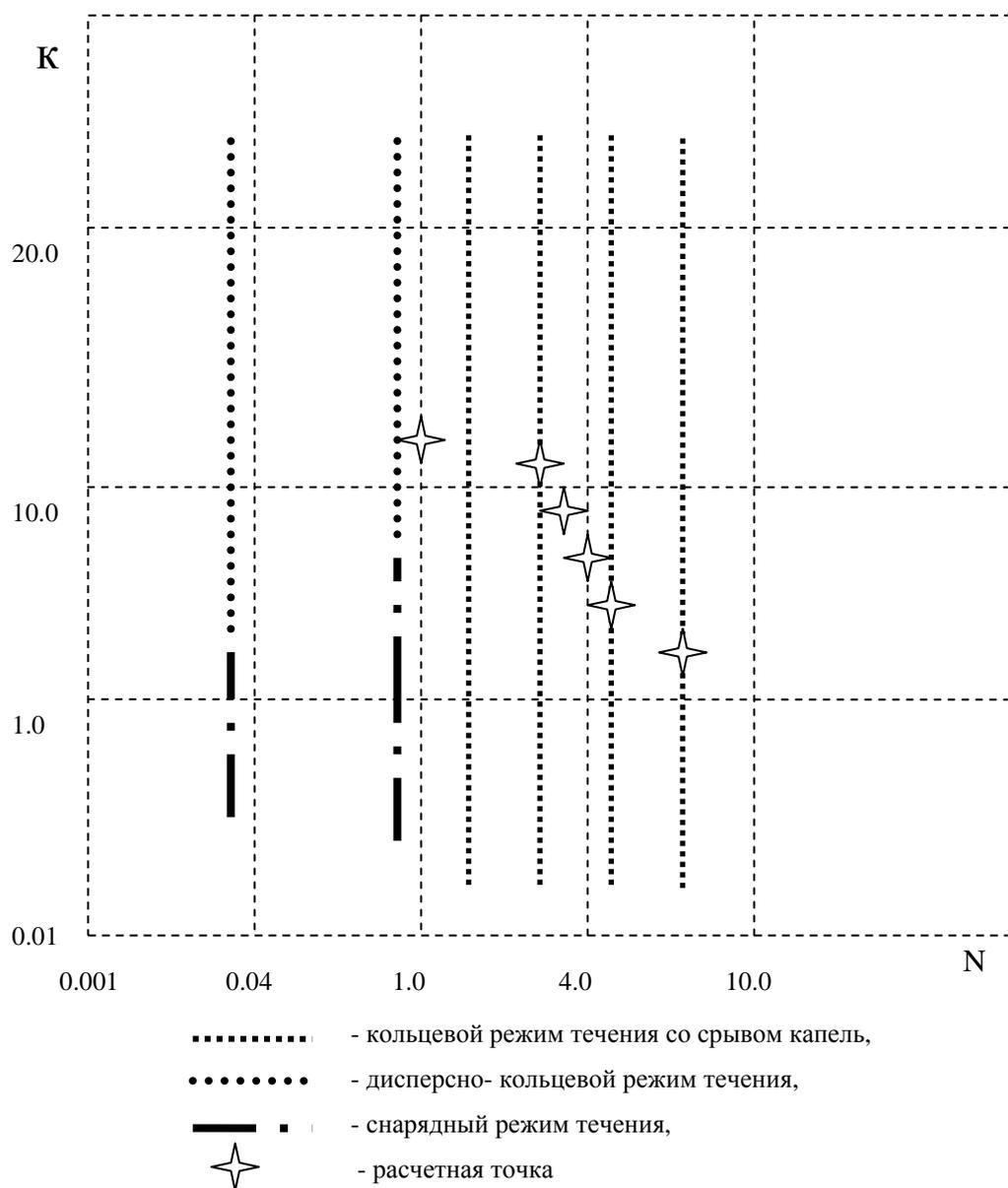


Рис. 2. Диаграмма режимов течения Кутателадзе - Сорокина

Наличие дисперсного режима течения при относительном газосодержании от 0.95 до 0.8, а также отдельного режима течения при уменьшении относительного газосодержания от 0.2 до 0.0 [1, 3] методикой Беггза и Брилла достоверно не определяется.

Рассмотрим методику Бейкера [6] определения параметров газожидкостного потока. На рис. 3 приведена диаграмма Бейкера режимов горизонтального двухфазного двухкомпонентного потока. В качестве комплексов приняты следующие соотношения:

$$\lambda = \left[ \left( \frac{\rho_{L4}}{1000} \right) \cdot \left( \frac{\rho_4}{1.2} \right) \right]^{0.5},$$

$$\psi = \left[ \left( \frac{73}{\sigma_{T4}} \right) \cdot \left( \frac{\mu_{T4}}{1} \right) \cdot \left( \frac{1000}{\rho_{L4}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (10)$$

где  $G_f, G_g \left[ \frac{кг}{м^2 \cdot час} \right]$  - массовые расходы жидкой и газовой фаз, соответственно.

Размерность коэффициента поверхностного натяжения  $\left[ \frac{дин}{см} \right]$ , коэффициента динамической вязкости  $[сПз]$ .

Таким образом, следуя диаграмме Бейкера, в рассматриваемом конденсаторе кольцевой режим течения реализован для значений газосодержания от 0.3 до 0.7, при газосодержании 0.2 и 0.1 – снарядный режим течения. Следует отметить, что возможность реализации снарядного и отдельного режимов течения на выходе из конденсатора установлена аналитически и экспериментально [2, 3, 17].

Таблица 2. Значения комплексов Бейкера

$X_{X4}$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,95
$G_g / \lambda$	$1,836 \cdot 10^4$	$3,672 \cdot 10^4$	$5,508 \cdot 10^4$	$7,343 \cdot 10^4$	$9,179 \cdot 10^4$	$11,02 \cdot 10^4$	$12,85 \cdot 10^4$	$17,44 \cdot 10^4$
$G_f \cdot \lambda \cdot \psi / G_g$	31,349	13,933	8,128	5,225	3,483	2,322	1,493	0,189

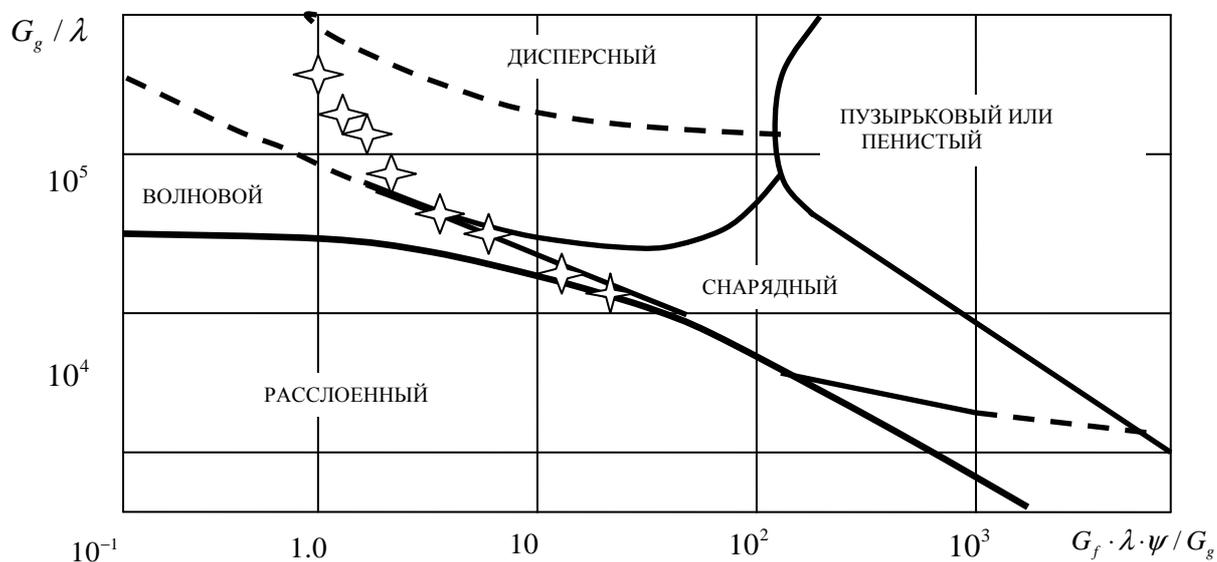


Рис. 3. Диаграмма Бейкера режимов горизонтального двухфазного двухкомпонентного потока.

В целом методики Бейкера и Кутателадзе – Сорокина могут быть использованы для регулирования режимов течения газожидкостного потока хладагента.

### III. ПРОЦЕСС ТЕПЛООБМЕНА

Вычисления значений чисел Нуссельта для разных режимов течения хладагента в конденсаторе проведены по методикам [1, 5, 15]. Получены величины удельной на единицу площади теплоты, отбираемой у хладагента, находящегося в разных режимах течения (первый: дисперсный – преобладание газовой фазы, второй: кольцевой, третий: расслоенный – преобладание жидкой фазы). Анализ процесса теплоотдачи показывает существенные различия чисел Нуссельта для разных режимов течения хладагента в конденсаторе [1, 5, 15]. Эти числа относятся как 1,0:3,2:5,0 для газожидкостных потоков при газосодержании 0,7 – 0,9; 0,1 – 0,3; 0,3 – 0,7, соответственно. Проведено сравнение процессов теплообмена в конденсаторе холодильной установки с увеличением области кольцевого режима течения и без ее увеличения (как практически реализуется во всех теплообменных устройствах). Расширение области кольцевого режима течения хладагента в конденсаторе может привести к изменению теплоотдачи до 20%. Показана возможность понижения температуры хладагента при его конденсации.

### IV. РЕГУЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В КОНДЕНСАТОРЕ ХОЛОДИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Предлагается для увеличения эффективности работы конденсатора (или испарителя) пароконденсационных теплообменных установок применить систему регулирования режимов течения газожидкостного потока, состоящую из следующих блоков:

- датчики измерения параметров газожидкостного потока,
- цифровой или аналоговый блок обработки и преобразования поступающей информации, а также формирования команд управления, поступающих от компьютера,
- устройства для изменения концентрации фаз,
- компьютер.

Принципиальная схема системы регулирования режимов течения приведена на рис. 4. Следуя методикам [17, 19, 20], получим математическую модель системы, схема которой приведена на рис. 4.

Рассмотрим случай без запаздывания (аперриодичности). Пусть за время  $\Delta t$  через устройство подачи жидкой фазы в трубу конденсатора поступило  $Cx\Delta t$  м<sup>3</sup> хладагента, где коэффициент  $C$  - отображает конструктивные свойства исполнительного блока,  $x = x(t)$  - расход жидкой фазы, поступающей конденсатор для регулирования режима течения.

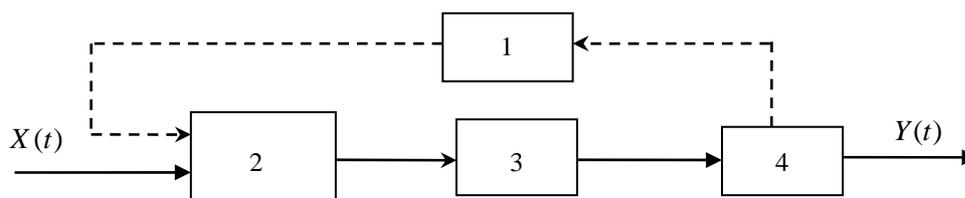


Рис. 4. Схема системы регулирования режимов течения. Обозначения: 1 – датчики, 2 – компьютер, 3 – преобразователь сигнала, 4 – исполнительный блок (устройства изменения газосодержания потока),  $X(t)$ ,  $Y(t)$  – сигналы входа и выхода

Вышеопределенное количество жидкости пошло на увеличение толщины жидкой пленки на внутренней стороне трубы конденсатора  $\Delta y$ , следовательно:

$$Cx\Delta t = B\Delta y, \quad (15)$$

где  $B$  – характеризует геометрические параметры геометрии трубопровода конденсатора.

Для упрощения дальнейших преобразований обозначим:  $C_0 = C / B$ . Рассмотрим возможность регулирования с запаздыванием. Полагаем: расход жидкой фазы, поступающей в конденсатор изменился, и равен  $x + \Delta x$ , где из (15) следует:

$$\Delta x = \frac{1}{C_0^2} \frac{\Delta^2 y}{\Delta t^2}. \quad (16)$$

Следовательно, дифференциальное уравнение, моделирующее динамические процессы имеет следующий вид:

$$\frac{1}{C_0^2} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2} - \frac{1}{C_0} \frac{dy}{dt} + x = 0, \quad (17)$$

Начальные условия:  $y(0) = 0$ ,  $y(T) = \delta_{LIQ}$ ,

где  $\delta_{LIQ}$  – толщина пленки жидкой фазы, для данной геометрии трубы конденсатора и режимов течения хладагента, Величина  $\delta_{LIQ}$  изменяется от 0.5 до 1.0 мм [6, 19] за время  $T$  – срабатывания исполнительного блока. Рассмотрим линейную зависимость  $x(t)$  от времени:

$$x(t) = At. \quad (18)$$

Решение уравнения (17) имеет следующий вид:

$$y(t) = \left( \frac{1}{2A} \cdot X(t)^2 + \frac{1}{C_0} X(t) + (\delta_{LIQ} - \frac{1}{2A} \cdot X(T)^2 - \frac{1}{C_0} X(T)) \cdot \left( \frac{e^{C_0 t} - 1}{e^{C_0 T} - 1} \right) \right) \quad (19)$$

Передаточная функция имеет следующий вид [20]:

$$G_p(s) = \frac{1}{C_0} + \frac{1}{s} + \frac{G_0 \cdot s}{s - C_0}, \quad (20)$$

где

$$G_0 = \frac{C_0}{A} \cdot \left( \frac{\delta_{LIQ} - \frac{1}{2A} \cdot X(T)^2 - \frac{1}{C_0} X(T)}{e^{C_0 T} - 1} \right), \quad (21)$$

Полученная передаточная функция соответствует пропорционально – интегральному звену с запаздыванием (со свойством апериодичности). Для рассмотренной модели холодильной установки и, следуя методикам регулирования режимов течения [2,3,6,19,20], целесообразно принять следующие исходные параметры: число отверстий в инжекторе исполнительного устройства  $N = 26$ , диаметр отверстий  $d = 1.5 \text{ мм}$ , скорость жидкой фазы

$V = 0.33 \left( \frac{M}{c} \right)$ . Тогда время срабатывания исполнительного блока  $T = 2.6$  (сек).

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненный анализ режимов течения хладагента в конденсаторе холодильной установки показал возможность увеличения ее эффективности. Методики Кутателадзе – Сорокина, Бейкера позволяют достоверно определить режим течения двухфазной среды и могут быть использованы в системе регулирования процесса теплоотдачи в конденсаторе парокompрессионной теплообменной установки.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. -5-е изд., доп. М. Атомиздат, 1979.- 416 с.

- [2] В. Маке, Г. – Ю. Эккерт, Ж. – Л. Кошпен. Учебник по холодильной технике. (пер. с франц.). М. Изд. МГУ, 1998. – 1529 с.
- [3] Б.К. Лэнгли. Холодильная техника и кондиционирование воздуха. – М. Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 479 с.
- [4] Теплофизические свойства фреонов. Том 1. Фреоны метанового ряда. Справочные данные/ Алтуниев В.В., Геллер В.З., Петров Е.К. и др.: Под ред. С.А. Ривкина; Госстандарт; ГСССД. – М.: Изд-во стандартов, 1980 – 232с., ил. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М. Энергия, 1975. – 486с.
- [5] Хьюитт Дж. и Холл – Тейлор Н. Кольцевые двухфазные течения. М. Энергия, 1974. – 408с.
- [6] Борис А.А., Лягов А.В. Определение режима течения потоков газожидкостной смеси в трубопроводах на установках путевого сброса воды Арланской группы месторождений ОАО «АНК Башнефть». Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», 2012, №2, <http://www.ogbus.ru>.
- [7] Бердников В.С., Митин К.А. Сопряженный конвективный теплообмен в вертикальном слое жидкости // Вестник НГТУ. Серия: Физика, 2012, Том: 7, № 1 С. 70-79.
- [8] Кутателадзе С.С., Волчков Э.П., Терехов В.И. Аэродинамика и тепломассообмен в ограниченных вихревых потоках // Новосибирск, 1987. – 272 с.
- [9] Терехов В.И., Калинина С.В., Леманов В.В. Механизм теплопереноса в наножидкостях: современное состояние проблемы (обзор). Часть 1. Теплопроводность наножидкостей // Теплофизика и аэромеханика. 2010. – Т. 17, N 1. – С. 1–18.
- [10] Choi S.U.S. Nanofluids: From Vision to Reality Through Research // J. of Heat Transfer. – 2009. – V. 131. – P. 033106-1 – 033106-9.
- [11] Terekhov V.I., Ekaid, A.L. Natural convection between vertical parallel plates with asymmetric heating and cooling // Proc. 6th Baltic Heat Transfer Conference. – №185, Tampere, 2011. –11 p.
- [12] Yu W., France D.M., Routbort J.L., Choi S.U.S. Review and Comparison of Nanofluid Thermal Conductivity and Heat Transfer Enhancements // Heat Transfer Engineering. –2008. – Vol. 29, №. 5. – P. 432-460.
- [13] Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296с.
- [14] V.G. Rifert, SS Ozimay. The analysis of the regimes of phases flow and of methods of calculation of heat transfer during the condensation inside the horizontal tubes // Heat Transfer in Condensation. Proc. Of the Eurotherm Seminar. October 4-5 – Paris (France),1995.- P. 78 – 85.
- [15] Терехов В.И., Пахомов М.А. Тепломассообмен и гидродинамика в газокapельных потоках. – Новосибирск: Изд – во НГТУ, 2008 – 284с.
- [16] Усачев А.П., Рулев А.В. Определение интенсивности теплообмена в проточных испарителях пропан – бутановых смесей с кипением жидкой фазы. // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело», №6, 2012. – С.376 – 385. <http://www.obus.ru>
- [17] Болтенко Э.А., Корниенко Ю.Н., Смирнов Ю.А., Болтенко Д.Э. Методы и средства для измерения характеристик термически неравновесного двухфазного потока. // Теплоэнергетика. 2001, №3, С. 34-39.
- [18] Уоллис Г. Одномерные двухфазные течения. М.: Мир, 1972. – 440с.
- [19] Шабаров А.Б., Вакулин А.А., Захаров А.А., Семихина Л.П., Саранчин Н.В., Вакулин А.А., Саранчин С.Н. Измерительно – вычислительная система диагностики параметров течения и теплообмена многофазной смеси в скважинах и трубопроводах. // Вестник Тюменского государственного университета. 2012, №4. С.74 – 79.
- [20] Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2002. – 832с.

- [21] Воевода А.А. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры / А.А. Воевода, В.В. Вороной. // Науч. вестник НГТУ. – 2013. – №2(51) С.214-218.
- [22] Воевода А.А. Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной на примере трёх массовой системы / А.А. Воевода, В.В. Вороной, Е.Б. Шоба // Науч. вестник НГТУ. – 2012. – № 1 (46). – С. 15–22.



**Гужов Владимир Иванович** – профессор кафедры «Системы сбора и обработки данных» НГТУ, доктор технических наук. Является автором 140 научных работ, в том числе 4 патентов. Область научных интересов: информационно-измерительные системы, высокоточные измерения. [e-vig@nstu.edu.ru](mailto:e-vig@nstu.edu.ru)



**Сажин Игорь Александрович** – доцент кафедры «Технической теплофизики» в НГТУ, доцент, кандидат технических наук. [sajinia@ngs.ru](mailto:sajinia@ngs.ru)



**Сажин Андрей Игоревич** – студент направления «Управление в технических системах» 4-го курса НГТУ.



**Шумейко Владимир Александрович**, старший преподаватель каф. АИУС НГТУ. [eraserus@cfsf.ru](mailto:eraserus@cfsf.ru)

## Method of Control of Process of Heat Irradiation in Condenser in Cooling Plant

Vladimir GUZHOV, Igor SAZHIN, Andrey SAZHIN, Vladimir SHUMEYKO

**Abstract:** In the paper parameters of control of two-phase state of refrigerating medium in the condenser of cooling plant are determined. System of automatic control of process of heat irradiation has been developed for the increasing of the effectiveness of cooling plant as a whole.

**Key words:** Condenser, Refrigerating Medium, System of Automatic Control.

# Модифицированный ПИД-регулятор

М.В. Скороспешкин, В.Н. Скороспешкин, Г.П. Цанко

ФГБОУ ВПО НИ ТПУ

**Аннотация.** Показана возможность создания модифицированного ПИД-регулятора на базе классического ПИД-регулятора, дополненного псевдолинейным звеном с амплитудным подавлением и псевдолинейным звеном с фазовым опережением. Установлено, что применение такого модифицированного ПИД-регулятора позволяет существенно улучшить качество переходных процессов в системах автоматического регулирования нестационарными объектами. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что данный регулятор целесообразно применять в системах, у которых параметры объекта управления меняются в широком диапазоне. И в этой связи такой регулятор можно рассматривать как робастный.

**Ключевые слова:** Модифицированный ПИД-регулятор, псевдолинейное звено с амплитудным подавлением, псевдолинейное звено с фазовым опережением, качество регулирования, нестационарный объект регулирования.

## ВВЕДЕНИЕ

Классический ПИД-регулятор обладает рядом недостатков, основными из которых являются наличие фазового запаздывания и высокая чувствительность к помехам в измерительном канале, поэтому он не всегда может дать хорошее качество регулирования [1].

Для устранения данных недостатков используют различные способы, например, в регулятор вводят фазопережающий фильтр [2], а также осуществляют коррекцию свойств ПИД-регулятора [4].

В данной работе приведены результаты исследования работы системы автоматического регулирования (САР) объектом управления (ОУ) второго порядка с использованием модифицированного ПИД-регулятора.

## ПРЕДЛАГАЕМАЯ СТРУКТУРА РЕГУЛЯТОРА

В состав данного регулятора включены следующие звенья: псевдолинейное звено с амплитудным подавлением, пропорциональное звено, интегрирующее звено, дифференцирующее звено, и псевдолинейное фазопережающее звено. Структурная схема модифицированного ПИД-регулятора представлена на рис. 1.

На рис.1 приведены следующие обозначения: ПА – псевдолинейное звено с амплитудным

подавлением; П – пропорциональное звено; И – интегрирующее звено; Д – дифференцирующее звено; ПФ – псевдолинейное звено с фазовым опережением.

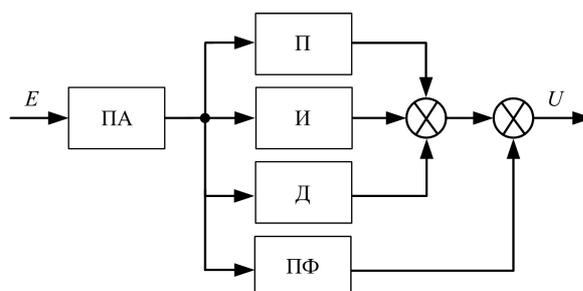


Рис.1. Структурная схема модифицированного ПИД-регулятора

Структурная схема псевдолинейного звена с амплитудным подавлением представлена на рис. 2.

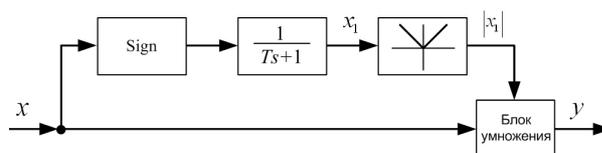


Рис.2. Структурная схема псевдолинейного звена с амплитудным подавлением

Звено состоит из оператора *Sign*, низкочастотного фильтра, блока определения модуля и перемножающего устройства. Амплитудно-фазовая частотная характеристика (АФЧХ) звена, полученная в результате гармонической линеаризации, имеет вид:

$$W(j\omega) = a + jb,$$

$$\text{где } a = \frac{8}{\pi^2 \cdot \sqrt{1+T^2\omega^2}} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \cos(2\theta)\right);$$

$$b = \frac{8}{\pi^2 \cdot \sqrt{1+T^2\omega^2}} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \sin(2\theta)\right); \quad \theta = -\arctg \omega T;$$

$\omega$  – угловая частота гармонических колебаний.

Анализируя представленную выше АФЧХ, можно показать, что при изменении частоты амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) данного звена меняется от значения, равного 1 до нуля. А изменение фазовой частотной характеристики (ФЧХ) при различных параметрах низкочастотного фильтра происходит не более чем на  $-20^\circ$ , в то время как максимальный фазовый сдвиг обычного апериодического звена первого порядка, может достигать  $-90^\circ$ . Работает

звено следующим образом. При возникновении в САР колебаний выходной величины объекта управления автоматически производится уменьшение коэффициента передачи звена.

Структурная схема псевдолинейного звена с фазовым опережением представлена на рис. 3.

Звено состоит из блока определения модуля, фазоопережающего звена, оператора Sign и перемножающего устройства.

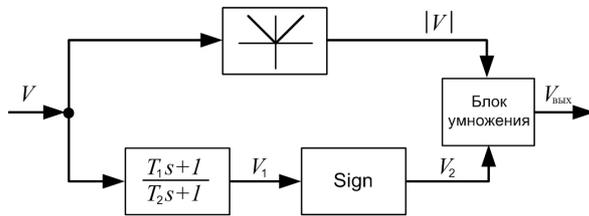


Рис.3. Структурная схема псевдолинейного звена с фазовым опережением

Коэффициенты гармонической линеаризации данного звена имеют вид:

$$a = \frac{1}{\pi}(\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha); \quad b = \frac{1}{\pi}(1 - \cos 2\alpha),$$

$$\text{где } \alpha = \arctg \frac{\omega T_1(1-v)}{1 + \omega^2 T_1^2 v}; \quad v = \frac{T_2}{T_1}.$$

Анализ частотных характеристик звена показывает, что при изменении частоты и варьировании постоянных времени звена  $T_2$  от 1 до 0,01 с,  $T_1$  от 1 до 10 с, ФЧХ претерпевает изменения в пределах от 0 до 78°, а логарифмическая АЧХ изменяется в пределах от 0 до -4 дБ [5].

Такое изменение АЧХ не оказывает существенного влияния на запас устойчивости САР. Данное псевдолинейное звено с фазовым опережением осуществляет фазовый сдвиг, величина которого зависит от значений постоянных времени  $T_1$  и  $T_2$ . Данное звено применяется для коррекции сигнала путем внесения в САР положительного фазового сдвига и тем самым улучшает качество регулирования.

### МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Для исследования работы модифицированного ПИД-регулятора была реализована модель САР в среде MATLAB 7.12, которая показана на рис. 4.

В модели есть две подсистемы с одинаковыми ОУ. В первой подсистеме применяется традиционный ПИД-регулятор. Во второй подсистеме применяется описанный выше модифицированный ПИД-регулятор, структурная схема которого показана на рис. 1.

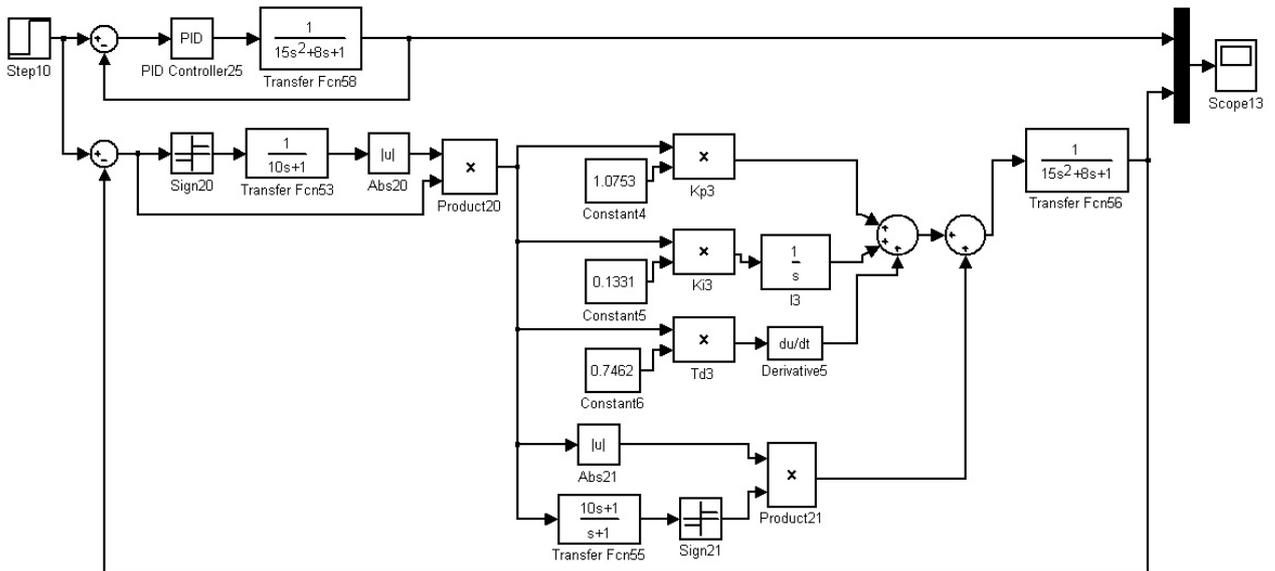


Рис.4. Модель САР в среде MATLAB

В системе используются ОУ второго порядка, имеющие передаточную функцию вида:

$$W_o(s) = \frac{K_o}{T_{o2}^2 s^2 + T_{o1} s + 1}, \quad (1)$$

где  $K_o$  – статический коэффициент передачи ОУ,  $T_{o1}$  и  $T_{o2}$  – постоянные времени.

Параметры ОУ имеют следующие значения:  $K_o=1$ ,  $T_{o2}=3,87298$  с,  $T_{o1}=8$  с.

Для данного объекта управления методом Циглера-Никольса были рассчитаны параметры

классического ПИД-регулятора для обеспечения аperiodического переходного процесса. Коэффициенты регулятора имеют следующие значения:  $K_p = 1,0753$ ;  $K_i = 0,1331$ ;  $K_d = 0,7462$ .

Для исследования свойств системы регулирования была проведена настройка модифицированного ПИД-регулятора: значения пропорциональной, интегральной и дифференциальной составляющих были приняты равными значениям классического ПИД-

регулятора. Постоянная времени фильтра псевдолинейного звена с амплитудным подавлением  $T = 10$  с. Параметры настройки фазопережающего звена были приняты равными:  $T_1 = 10$  с,  $T_2 = 1$  с.

На рис. 5 приведены кривые переходных процессов для двух систем с параметрами ОУ и настройками регуляторов описанными выше.

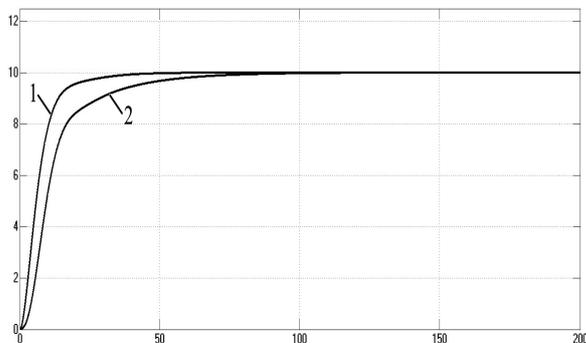


Рис. 5. Кривые переходных процессов

Кривая 1 соответствует системе с классическим ПИД-регулятором, а кривая 2 – системе с модифицированным ПИД-регулятором.

Как видно из рисунка характер переходных процессов является аperiodическим. В системе с модифицированным ПИД-регулятором время регулирования немного больше, чем в системе с ПИД-регулятором.

На рис. 6 приведены кривые переходных процессов для этих же САП, с изменившимися параметрами ОУ. Значения изменившихся параметров ОУ являются следующими:  $K_0 = 1$ ;  $T_{02} = 7,0710$  с;  $T_{01} = 8$  с. При этом параметры ПИД-регулятора и модифицированного ПИД-регулятора остались неизменными.

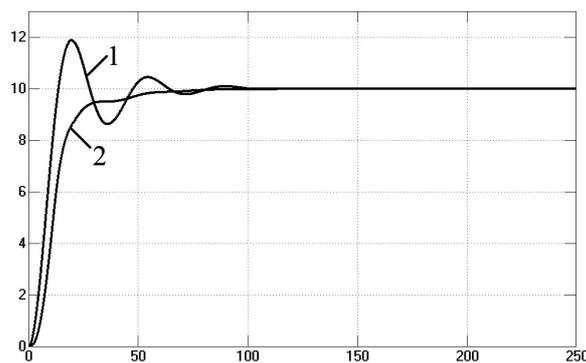


Рис. 6. Кривые переходных процессов

Кривая 1 соответствует системе с классическим ПИД-регулятором, а кривая 2 – системе с модифицированным ПИД-регулятором.

Как видно из рисунка качество регулирования САП с ПИД-регулятором при изменившихся параметрах ОУ является намного хуже, чем качество САП с модифицированным ПИД-регулятором.

Проведенные исследования систем

регулирования с предложенным регулятором показывают, что псевдолинейный ПИД-регулятор эффективно работает в условиях, когда параметры объекта управления меняются в широком диапазоне. И в этой связи такой регулятор можно рассматривать как робастный.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе рассмотрено псевдолинейное фазопережающее звено, фазовая характеристика которого претерпевает изменения в пределах от 0 до  $78^\circ$ . При необходимости подъема фазо-частотной характеристики на большую величину можно использовать псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением [3]. Данное звено обеспечивает подъем фазо-частотной характеристики до  $175^\circ$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Изд. Наука, 1975.
- [2] Скороспешкин М.В. Адаптивные псевдолинейные корректоры динамических характеристик систем автоматического регулирования // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – №7. – С. 172 – 176.
- [3] Скороспешкин М.В., Скороспешкин В.Н. Псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением // Патент на полезную модель №104332 (RU 104332 U1) По заявке №2010149922/08 от 03.12.2010. Опубликовано: 10.05.2011 RU БИПМ №13.
- [4] Хлыпало Е.И. Нелинейные корректирующие устройства и автоматических системах. Лен.: Изд. Энергия, 1973.

**Скороспешкин Максим Владимирович** – доцент кафедры автоматки и компьютерных систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, к.т.н.,  
e-mail: [smax@tpu.ru](mailto:smax@tpu.ru).

**Скороспешкин Владимир Николаевич** – доцент кафедры автоматки и компьютерных систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, к.т.н.,  
e-mail: [shedar@tpu.ru](mailto:shedar@tpu.ru).

**Цапко Геннадий Павлович** – заведующий кафедрой автоматки и компьютерных систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, д.т.н., профессор.  
e-mail: [tsapko@aic.ru](mailto:tsapko@aic.ru).

## Modified PID-Regulator

Maxim SKOROSPESHKIN,  
Vladimir SKOROSPESHKIN,  
Gennadiy TSAPKO

*Abstract:* The paper demonstrates the possibility

of creation of modified PID-regulator on the base of classical PID-regulator supplemented with pseudo-linear chain with amplitude suppression and with the phase forestalling. It is established that the use of such modified PID-regulator allows increasing of the quality of transient processes in systems of automatic control of non-stationary objects. On the base of the fulfilled researches the conclusion has been stated

that the said regulator is useable for the systems in which the parameters are changing in wide range. Therefore said regulator can be treated as robust one.

*Key words:* Modified PID-regulator, pseudo-linear chain with amplitude suppressing, pseudo linear chain with phase forestalling, quality of control, non-stationary controlled object.

# Адаптивная система регулирования температуры теплообменника

М.В. Скороспешкин, В.Н. Скороспешкин, Г.П. Цанко

ФГБОУ ВПО НИ ТПУ

**Аннотация.** Показана возможность создания адаптивной системы автоматического регулирования температуры теплообменника на базе ПИ-регулятора и последовательного адаптивного псевдолинейного корректирующего устройства с фазовым опережением, которое повышает запас устойчивости по фазе при изменении параметров объекта управления. Установлено, что применение предложенной адаптивной системы позволяет существенно улучшить качество переходных процессов в системах автоматического регулирования нестационарными объектами. На основании проведенных исследований сделан вывод о том, что при изменении запаздывания объекта управления, качество предложенной системы является значительно лучшим, по сравнению с обычной системой с ПИ-регулятором.

**Ключевые слова:** Адаптивная система регулирования, псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением, нестационарный объект регулирования, качество регулирования.

В технологическом процессе сушки пирогаза происходит многоступенчатое отделение пирогаза от содержащихся в нем углеводородного конденсата и воды. Образующееся при этом тяжелое жидкое топливо (пирококонденсат) прежде чем попасть на склад, проходит через кожухотрубный теплообменник, где должно быть нагрето до температуры 90 градусов Цельсия.

Система автоматического регулирования (САР) температуры в теплообменнике является одноконтурной системой автоматического регулирования с ПИ-регулятором. Данная система должна постоянно поддерживать в теплообменнике температуру равную 90 градусам Цельсия.

Передаточная функция теплообменника имеет вид:

$$W(s) = \left( \frac{9}{0,275 \cdot p + 1} \right) \cdot \left( \frac{1 - 0,7 \cdot e^{-10 \cdot p}}{(25,8 \cdot p + 1)(0,94 \cdot p + 1)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1,117 \cdot p + 1} \right); \quad (1)$$

Коэффициенты ПИ-регулятора:  $K_p = 0,155$ ;  $K_i = 0,0735$ ;

Как видно из формулы (1) данный объект управления обладает существенным запаздыванием. Коэффициенты ПИ-регулятора рассчитаны таким образом, чтобы компенсировать запаздывание объекта

управления и обеспечить удовлетворительное качество регулирования.

Однако, при изменении параметров объекта управления в процессе работы САР, либо при поступлении возмущений в систему управления, регулятор уже не обеспечивает удовлетворительного качества регулирования, вплоть до того, что система может стать неустойчивой.

Это не только может привести к выпуску бракованной продукции, но и отрицательно сказывается на уровне взрыво и пожаробезопасности объекта.

В САР нестационарными объектами для осуществления заданного качества регулирования в процессе работы необходимо обеспечить целенаправленное изменение динамических характеристик регулирующего устройства таким образом, чтобы компенсировать нежелательные изменения свойств объекта управления.

В большинстве случаев это осуществляется изменением параметров пропорционально-интегрально-дифференциальных регуляторов (ПИД-регуляторов). Такие подходы описаны, например, в [1,2], однако реализация этих подходов связана, либо с идентификацией, либо с использованием специальных способов, основанных на вычислениях по кривой переходного процесса. Оба эти подхода достаточно сложны и требуют значительного времени на подстройку.

В предложенной системе для улучшения качества регулирования температуры в теплообменнике, в САР вводится последовательное адаптивное псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением [3]. Данное корректирующее устройство повышает запас устойчивости по фазе при изменении параметров объекта управления.

Структурная схема САР с адаптивным корректирующим устройством приведена на рисунке 1.

На рисунке 1. использованы следующие обозначения: БАО – блок анализа сигнала ошибки; БНПАКУ – блок настройки псевдолинейного адаптивного корректирующего устройства; ГДС – генератор диагностического сигнала.

Работа САР с адаптивным псевдолинейным корректирующим устройством с фазовым опережением осуществляется следующим образом. При первоначальном запуске системы в

работу, в установившемся режиме ГДС подает в систему прямоугольный диагностический

импульс с заданной амплитудой и длительностью.

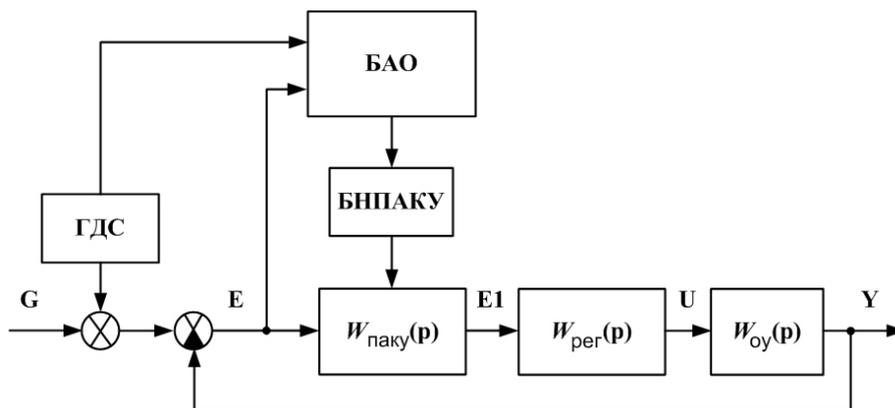


Рис 1. Структурная схема САР

После подачи диагностического импульса в блоке БАО происходит подсчет интегральной квадратичной оценки ошибки за определенный период времени. Подсчитанная интегральная квадратичная оценка ошибки запоминается в блоке БНПАКУ как эталонная. Далее, через определенный период времени, ГДС вновь выдает в систему диагностический сигнал, а блок БАО вновь подсчитывает интегральную квадратичную оценку ошибки. Далее текущая интегральная квадратичная оценка ошибки сравнивается с эталонной интегральной квадратичной оценкой и на основании их сравнения в блоке БНПАКУ принимается решение о подстройке корректирующего устройства к изменившимся параметрам объекта управления.

Если решение о подстройке корректирующего устройства не принято, то ГДС будет периодически выдавать в систему диагностический сигнал, а блок БНПАКУ подсчитывать и сравнивать текущую и эталонную интегральные квадратичные оценки ошибок.

Если принимается решение о подстройке корректирующего устройства к изменившимся параметрам объекта управления, то в блоке БНПАКУ рассчитывается коэффициент настройки корректирующего устройства (постоянная времени дифференцирования интегро-дифференцирующего звена корректора) который поступает в корректор и запоминается в нем. Далее ГДС вновь формирует диагностический сигнал и все действия повторяются по циклу.

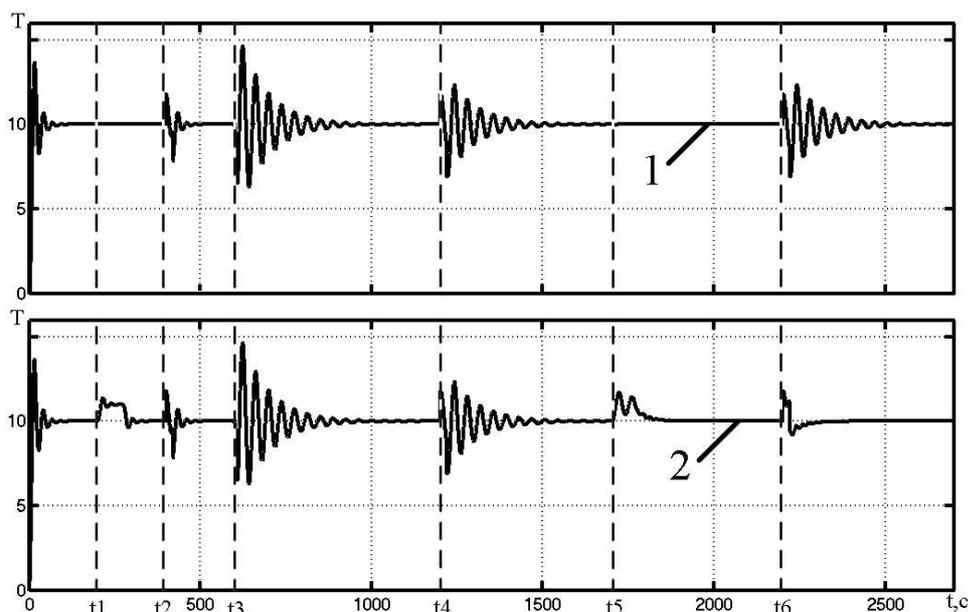


Рис 2. Графики переходных процессов

Таким образом, происходит автоматическая подстройка корректирующего устройства к изменившимся параметрам объекта управления.

На рисунке 2 для иллюстрации работы системы представлены кривые переходных процессов на ступенчатое задающее воздействие САР температуры в кожухотрубном теплообменнике с ПИ-регулятором (кривая 1) и САР, дополненной последовательным адаптивным псевдолинейным корректирующим устройством с фазовым опережением (кривая 2).

Объект управления описывается формулой (1), коэффициенты ПИ-регулятора для обеих систем одинаковы и приведены выше.

В момент времени  $t_1$  в систему поступает первый диагностический импульс, далее считается эталонная интегральная оценка ошибки. В момент  $t_2$  в систему приходит импульсная помеха и как видно из графиков качество отработки помехи удовлетворительное.

Далее в момент времени  $t_3$  меняются параметры объекта управления. Передаточная функция объекта управления принимает вид:

$$W(s) = \left( \frac{9}{5 \cdot p + 1} \right) \cdot \left( \frac{1 - 0,7 \cdot e^{-10 \cdot p}}{(25,8 \cdot p + 1) \cdot (0,94 \cdot p + 1)} \right) \cdot \left( \frac{1}{1,117 \cdot p + 1} \right);$$

В момент  $t_4$  в систему приходит вторая импульсная помеха и как видно из графиков качество отработки помехи, при изменившихся параметрах объекта управления становится значительно хуже.

В момент времени  $t_5$  ГДС посылает в систему второй диагностический импульс, считается интегральная квадратичная оценка, сравнивается с эталонной и принимается решение о подстройке корректора. Затем рассчитывается значение коэффициента настройки корректора, после чего происходит подстройка корректирующего устройства.

Далее в момент времени  $t_6$  в систему приходит очередная импульсная помеха, которая, как видно из графиков, в системе с корректором обрабатывается со значительно лучшим качеством, чем в системе без корректора.

Проведенные исследования так же показали, что при увеличении запаздывания объекта управления, качество САР с адаптивным корректирующим устройством является значительно лучшим, чем в системе без корректора.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] В.В. Солдатов, П.Е. Ухаров. Адаптивная настройка систем управления с ПИД-регуляторами в условиях информационной неопределенности //

Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2004. № 8. С. 16–20.

[2] Ш.Е.Штейнберг, И.Е. Залуцкий, Л.П. Серезин, И.Г. Варламов. Настройка и адаптация автоматических регуляторов. Инструментальный комплект программ // Промышленные АСУ и контроллеры. 2003. № 10. С. 43–47.

[3] М.В. Скороспешкин. Адаптивные псевдолинейные корректоры динамических характеристик систем автоматического регулирования // Известия Томского политехнического университета. 2006. Т. 309. №7. С. 172–176.

**Скороспешкин Максим Владимирович** – доцент кафедры автоматки и компьютерных систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, к.т.н.

**e-mail:** [smax@tpu.ru](mailto:smax@tpu.ru)

**Скороспешкин Владимир Николаевич** – доцент кафедры автоматки и компьютерных систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, к.т.н.

**e-mail:** [shedar@tpu.ru](mailto:shedar@tpu.ru)

**Цапко Геннадий Павлович** – заведующий кафедрой автоматки и компьютерных систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, д.т.н., профессор.

**e-mail:** [tsapko@aics.ru](mailto:tsapko@aics.ru)

## Adaptive System for Temperature Control of Thermal Exchanger

Maxim SKOROSPESHKIN,  
Vladimir SKOROSPESHKIN,  
Gennadiy TSAPKO

*Abstract.* The paper demonstrates the possibility of creating of adaptive system of automatic control of thermal exchanger temperature on the base of PI-regulator and successive adaptive pseudo-linear correcting elements with phase forestalling, which increases the phase stability margin for the case of changing of controlled object parameters. It is established that the use of such proposed adaptive system allows sufficient increasing of the quality of transient processes in systems of automatic control of non-stationary objects. On the base of the accomplished researches the conclusion is made that the quality of the proposed system remains much better if compared with this of system with PI-regulator when the delay of object is changing.

*Key words:* Adaptive system of control, pseudo-linear chain with phase forestalling, non-stationary controlled object, quality of control.

**II. Робототехника.  
Программные средства и системы.  
Свободное программное  
обеспечение.  
Открытое программное обеспечение.**

## Содержание раздела:

- Р. Н. Усманов, К. К. Сеитназаров. Программный комплекс нечетко-детерминированного моделирования гидрогеологических объектов. (Ташкентский университет информационных технологий Ташкент, Узбекистан). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 29–34.
- А.А. Пономарев, Э.С. Меркер Интегрированная электронная медицинская карта ребенка. (НИ ТПУ, ООО «Медицинские информационные технологии», Томск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 35–39.
- А. М. Малышенко, Е. А. Рыбаков, Е. А. Кочеткова. Программное обеспечение для определения индексов каузальности линейных вход-выходных динамических систем (НИ ТПУ, Томск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 40–50.

# Программный комплекс нечетко-детерминированного моделирования гидрогеологических объектов

Усманов Р.Н., Сеитназаров К.К.

Ташкентский университет информационных технологий Ташкент, Узбекистан  
[brah2008@rambler.ru](mailto:brah2008@rambler.ru)

**Аннотация.** Предлагается структура программного комплекса для моделирования геофильтрационных процессов в плане, в условиях нечеткой исходной информации. Рассмотрены вопросы нечетко-детерминированного моделирования, основанного на нечеткой формализации параметров водозаборов подземных вод. Приведены результаты вычислительных экспериментов на примере однослойной геофильтрационной системы.

**Ключевые слова:** водозаборы подземных вод, нечетко-детерминированный подход, вычислительный процесс, информационная модель, геофильтрация, функция принадлежности.

## ВВЕДЕНИЕ

Ныне для большинства гидрогеологических объектов (ГГО) характерными является усиление влияния на них техногенных факторов, которые служат причинами недоверности данных, результатов измерения параметров среды и т. п.

Вследствие неопределенности, неясности, недетерминированности, непредсказуемости, нехватки данных и т. п. возникает необходимость интеграции решения задач моделирования и принятия решений в рамках единой вычислительной системы. При этом под данными понимается вся доступная информация, представляемая в численной (результаты полевых измерений), лингвистической (опыт, знания, интуиции специалистов–экспертов выраженное в лингвистической форме), нечеткой (вербальные оценки параметров, литология пластов) формах.

Нечетко-детерминированный подход предполагает интеграцию принципов теории нечетких множеств на всех этапах моделирования и принятия решений. Предлагаемый программный комплекс состоит из программных модулей, формирующих модели ГГО и процесса геофильтрации в условиях доминирования информации нечеткого характера, а также модулей решения идентификационных задач, организации взаимосвязи между моделью ГГО и объектом моделирования. В качестве предметной области рассматривается процесс обоснования проекта водозабора подземных вод (ВПВ) для

однослойного водоносного горизонта, с неоднородной в плане областью фильтрации.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Основой процесса обоснования проекта ВПВ является нечетко-детерминированная модель геофильтрации для однослойного водоносного горизонта, что позволяет непосредственно использовать в процессе моделирования и принятия решений (ПР) информацию нечеткого характера, выражающую опыт, знания, интуиции гидрогеологов в представленной лингвистической форме. Гидрогеологические, гидрохимические и гидрологические условия на предполагаемых месторождениях подземных вод (ПВ) и заданный режим водопотребления на хозяйственно-питьевые нужды являются определяющими в выборе технологических схем и конструкций водозаборов с искусственным формированием и искусственным восполнением (ИФ и ИВ), а также параметров [4]. Выбор и обоснование технологических схем ВПВ осуществляется на основе анализа литологии, мощности, ширины и длины водоносных пластов, начальных и граничных гидрогеологических, гидрологических и гидрохимических условий [5].

Процесс обоснования ВПВ состоит из следующих взаимосвязанных этапов:

- оценка эксплуатационных возможностей выделенных участков;
- выбор технологических схем формирования и эксплуатации водозабора.

Процесс обоснования технологических схем водозаборов в условиях их формирования и эксплуатации включает в себя обоснование по геофильтрационным отношениям и по характеру гидродинамической взаимосвязи поверхностных и подземных вод. Для однослойных пластов возможны следующие схемы [5]:

1. В паводок – искусственное восполнение подземных вод (ИВ ПВ) при условии подпертой и свободной фильтрации;
2. В межень - эксплуатация водозабора при условии отсутствия питания из поверхностных водотоков.

Технологическая схема ИФ и ИВ запасов пресных подземных вод (ЗПВ) состоит из водозабора, расположенного на расстоянии  $L_1$  от

ирригационного канала (ИК) и на расстоянии  $L_2$  от проточного канала, параллельного водозабору, что позволяет производить ИФ и ИВ запасов пресных вод (рис.1).

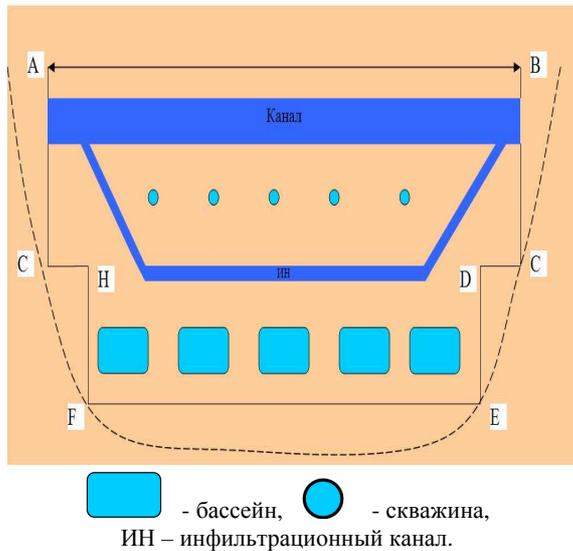


Рис.1. Технологическая схема водозабора с ИФ и ИВ ЗПВ [4, 5]

Математическое моделирование геофильтрационных процессов для гидрогеологических объектов природно-техногенного характера осуществляется на базе нечетко-детерминированной модели геофильтрации, которая для однослойного строения водоносного горизонта имеет следующий вид [1–3, 6–7, 13–15]:

$$\mu \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \tilde{k} h \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \tilde{k} h \frac{\partial h}{\partial y} \right) + f - w \quad (1)$$

$$h(x, y, 0) = \tilde{h}_0(x, y), \quad (x, y) \in D \quad (2)$$

$$\alpha h(x, y, t) + \beta \left( \tilde{k} h \frac{\partial h}{\partial n} \right) \Big|_{(x, y) \in \Gamma} = \tilde{\gamma}(x, y, t) \quad (3)$$

$$\alpha^2 + \beta^2 > 0, \quad t > 0.$$

Здесь  $\mu$  – коэффициент водоотдачи (недостатка насыщения);  $h(x, y, t)$ ,  $f(x, y, t)$ ,  $w(x, y, h, t)$  – функции уровней грунтовых вод (ГВ), инфильтрации, испарения с поверхности уровня грунтовых вод (УГВ),  $D$  – область фильтрации (ОФ);  $\Gamma$  – граница ОФ;  $n$  – нормаль к границе ОФ,  $\tilde{h}_0(x, y)$ ,  $\tilde{k}(x, y)$ ,  $\tilde{\gamma}(x, y, t)$  – заданные нечеткие фильтрации.

Нечетко-детерминированная модель при конкретных данных, определяемых природной обстановкой (1)-(3) реализуется на основе применения метода конечных разностей [10, 11, 14].

В процессе решения конкретных задач на базе (1)-(3) решаются обратная, эпигнозная и прямые задачи. При этом процесс формализации значений нечеткого

параметра  $\tilde{K} = \tilde{K}(x, y)$  осуществляется на основе принципов теории нечетких множеств (ТНМ), путем построения функции принадлежности (ФП) нечеткого параметра  $\tilde{K} = \tilde{K}(x, y)$ , где  $x, y$  – координаты точки ОФ.

При этом для формализации  $\tilde{K} = \tilde{K}(x, y)$  применяются трапециевидные нечеткие числа  $\tilde{K}$ , определяемые выражением [8, 9]:

$$\tilde{K} = (\underline{K}_0, \overline{K}_0, \underline{K}_1, \overline{K}_1)$$

(4)

где  $\underline{K}_0$  ( $\overline{K}_0$ ) – нижняя (верхняя) граница нечеткого числа  $\tilde{K}$  на нулевом  $\alpha$ -уровне;  $\underline{K}_1$  ( $\overline{K}_1$ ) – нижняя (верхняя) граница нечеткого числа  $\tilde{K}$  на единичном  $\alpha$ -уровне; промежуток  $[\underline{K}_1, \overline{K}_1]$  называется оптимистической оценкой параметра  $K$ , а интервал  $[\underline{K}_0, \overline{K}_0]$  – пессимистической оценкой характера  $K$ .

Далее, осуществляется переход к лингвистической  $-l$  форме  $\tilde{K}$ .

## СТРУКТУРА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА

Программный комплекс FVARH нечетко-детерминированного моделирования гидрогеологических объектов в условиях однослойного строения водоносного горизонта реализован на основе локально-одномерного метода А.А.Самарского [10, 11] в виде комплекса программ FVARH на языке С# [16].

Структура программного комплекса FVARH (рис. 2) включает блоки формирования модели объекта (ГГО), организации вычислительного процесса, формирования информационных моделей ГГО и процесса фильтрации (ИМ ВПВ, ИМ ПФ), принятия решений по ситуациям, балансовым элементам, ситуациям. Основные обозначения по комплексу программ FVARH приводятся ниже (см. рис. 2).

На этом рис. 2 приняты обозначения: СОФ – сегментация области фильтрации, ИВС – информация о водозаборах сооружений, ИИС – информация о инфильтрационных сооружениях, СП ВПВ – символьные представления ВПВ, СВП – строение водоносного пласта, НГУ – начальные и граничные условия, СППФ – символьное представление, ССМПФ – синтез структуры модели ПФ, ПИ – параметрическая идентификация, ОВП – организация вычислительного процесса, АПР – анализ полученных результатов, ВР – визуализация результатов, МТС – множество типовых состояний,

МЭС – множество эталонных состояний,  
 СА – ситуационный анализ,  
 ПР – принятие решений,  
 РР – реализация решений,  
 НТМ ВПВ – новая технологическая модель,  
 ВМ – введение нечетких переменных,  
 ВОКПР – выбор и обоснование критериев  
 принятия решений,  
 ПФПХПОФ – построение функций принадлеж-  
 ностей параметров и характеристик ОФ,  
 НДС ВПВ – нечеткая диагностика состояний  
 ВПВ,

ВОСРВС – выбор оптимальной схемы  
 расположения водозаборных сооружений,  
 ВОСРИС – выбор оптимальной схемы  
 расположения ИС,  
 ОТМ ВПВ – оптимизации технологической  
 модели ВПВ,  
 ПРПХ – принимаемое решение  
 предупредительного характера,  
 ПРВХ – принимаемое решение  
 восстановительного характера,  
 ПРЛХ – принимаемое решение локализационного  
 характера,  
 НППОФ – нечеткое представление параметров  
 ОФ,  
 СПИМ ВПВ – символьное представление ИМ  
 ВПВ,  
 ГПР – графическое представление результатов,  
 ТПР – табличное представление результатов,  
 КПР – картографическое представление  
 результатов.

Информационные модели ИМ ВПВ и ИМ ПФ обеспечивают взаимосвязь между моделью объекта и процессом геофильтрации, представляемого в виде системы двумерных (квазитрехмерных) нелинейных дифференциальных уравнений фильтрации и позволяют организовать вычислительные эксперименты (ВЭ) по обоснованию моделей объекта, изучаемых процессов, принимаемых решений с учетом различных параметров и факторов.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В качестве примера рассмотрим процесс решения обратной задачи по ВПВ информационного моделирования ВПВ представленной на рис. 3. ОФ заменена на сеточную область с 25 строками и 12 столбцами, с шагом 100 м. ОФ неоднородная в фильтрационном отношении, имеются 3 зоны с различными значениями коэффициента фильтрации:

15-25 м/сут; 25-35 м/сут; 30-40 м/сут. ВЭ проведены в следующем порядке:

1. Построение информационно-технологическая модель ВПВ (рис. 3, 4).
2. Построение информационной модели для определения коэффициентов фильтрации на нечетко-детерминированной основе (рис. 6).
3. Формирование нечетких значений коэффициентов фильтрации (рис. 6).
4. Решение обратной задачи и представление результатов решение обратной задачи в графической форме (рис. 6, 7, 8).

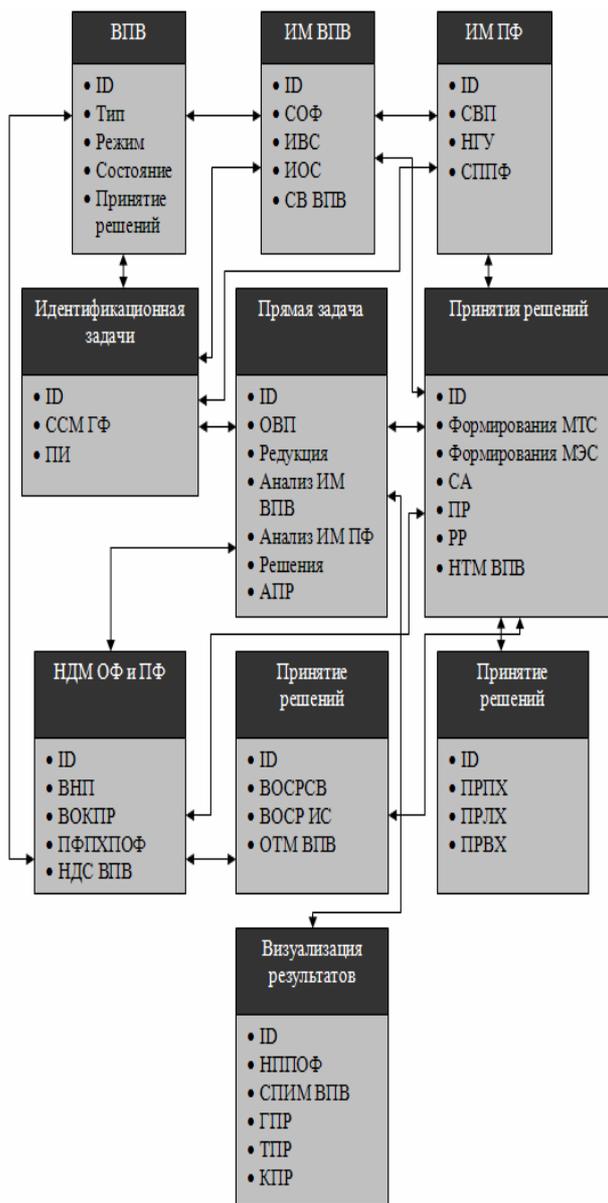


Рис.2. Структурная схема программного комплекса FVARH

10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	
10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	
10000	10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	10000	
10000	10000	10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	10000	10000
10000	10000	10000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10000	10000	10000	10000
10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000	10000

Рис.3. Информационно – технологическая модель ВПВ

СТРОКА= 1  
 101050110105021010503201050410105052010501201050220105032010502201050330105013010502301050330105053010501301050230105033010505  
 СТРОКА= 2  
 101050110105022010503101050420105012010502201050320105033010501301050230105023010503301050230105013010502301050230105033010502  
 СТРОКА= 3  
 101050120105022010501201050220105032010504301050120105023010502301050330105043010502301050120105023010502301050330105043010502  
 СТРОКА= 4  
 1010501101050220105012010502301050130105022010503301050430105043010505301050530105022010503301050430105043010505301050530105023010501301050230105033010502  
 СТРОКА= 5  
 1010501101050220105031010504101050520105012010502201050320105033010504301050430105053010505301050530105023010501301050230105033010502  
 СТРОКА= 6  
 101050110105021010503201050420105012010502201050330105012010503301050430105043010505301050530105023010502301050230105033010501  
 СТРОКА= 7  
 101050110105022010501201050220105032010504301050130105022010503301050430105043010505301050530105023010502301050330105043010501  
 СТРОКА= 8  
 101050110105021010503201050420105012010502201050330105012010503301050430105043010505301050530105023010502301050230105033010501  
 СТРОКА= 9  
 101050110105022010501201050220105032010504301050130105022010503301050430105043010505301050530105023010502301050330105043010501

Рис.4. Представление параметров в цифровой форме (среда неоднородная)

М(1)	НС(1)	С(1)	ВС(2)	НБ(1)	М(2)	НС(2)	С(2)	НС(2)	С(2)	М(3)	НС(3)	С(3)	НБ(3)	М(3)	НС(3)	С(3)	НБ(3)	
М(1)	НС(1)	С(2)	ВС(1)	М(2)	НС(2)	С(2)	НС(3)	НС(3)	НС(3)	С(3)	НС(3)	С(3)	НС(3)	М(3)	НС(3)	НС(3)	С(3)	НС(3)
М(1)	НС(2)	М(2)	НС(2)	С(2)	ВС(2)	М(3)	НС(3)	С(3)	ВС(3)	НС(3)	М(3)	НС(2)	НС(3)	С(3)	ВС(3)	НС(3)	С(3)	НС(3)
М(1)	НС(2)	М(2)	НС(2)	М(3)	НС(3)	С(2)	ВС(3)	ВС(3)	НБ(3)	НБ(3)	НС(3)	С(2)	ВС(3)	ВС(3)	НБ(3)	НБ(3)	НС(3)	НС(3)
М(1)	НС(1)	С(2)	ВС(1)	НБ(1)	М(2)	НС(2)	С(2)	С(2)	ВС(3)	ВС(3)	НБ(3)	НБ(3)	НС(3)	М(3)	НС(3)	С(3)	НС(3)	
М(1)	НС(1)	С(1)	ВС(2)	М(2)	НС(2)	С(2)	М(3)	С(2)	ВС(3)	ВС(3)	НБ(3)	НБ(3)	НС(3)	НС(3)	НС(3)	С(3)	М(3)	
М(1)	НС(1)	М(2)	НС(2)	С(2)	ВС(2)	М(3)	НС(3)	С(2)	ВС(3)	ВС(3)	НБ(3)	НБ(3)	НС(3)	НС(3)	С(3)	ВС(3)	М(3)	
М(1)	НС(1)	С(1)	ВС(2)	М(2)	НС(2)	С(2)	М(3)	С(2)	ВС(3)	ВС(3)	НБ(3)	НБ(3)	НС(3)	НС(3)	НС(3)	С(3)	М(3)	
М(1)	НС(1)	М(2)	НС(2)	С(2)	ВС(2)	М(3)	НС(3)	С(2)	ВС(3)	ВС(3)	НБ(3)	НБ(3)	НС(3)	НС(3)	С(3)	ВС(3)	М(3)	

Рис.5. Представление параметров в нечетком виде (среда неоднородная). Здесь: м – малое, с – среднее, нс – ниже среднее, вс – вышесреднее, нб – наибольшее, 1,2,3 – номера зон неоднородностей

100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	99.50	98.50	98.50	98.50	98.50	99.50	98.50	98.50	98.50	98.50	100.00
100.00	100.00	100.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00	98.00
98.00	98.00	97.50	97.50	97.00	97.00	97.00	97.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	98.50	98.50	98.50	98.50
97.50	97.50	97.00	97.00	97.00	97.00	97.00	97.50	97.50	97.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	98.50	98.50	98.50	98.50
97.50	97.50	97.50	97.50	97.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50
98.00	98.00	97.50	97.50	97.00	97.00	97.00	97.00	97.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.00	97.50	97.50	97.50	97.50
97.50	97.50	97.50	97.50	97.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50

Рис.6. Начальное распределение уровней ГВ

15.00	17.50	20.00	32.50	25.00	25.00	27.50	30.00	27.50	30.00	30.00	32.50	35.00	40.00	30.00	32.50	35.00	40.00
15.00	17.50	30.00	22.50	25.00	27.50	30.00	30.00	30.00	32.50	32.50	35.00	32.50	30.00	32.50	32.50	35.00	32.50
15.00	27.50	25.00	27.50	30.00	32.50	30.00	27.50	32.50	35.00	37.50	32.50	30.00	27.50	32.50	35.00	37.50	32.50
15.00	27.50	25.00	27.50	30.00	32.50	30.00	37.50	37.50	40.00	40.00	32.50	30.00	37.50	37.50	40.00	40.00	32.50
15.00	17.50	30.00	22.50	25.00	25.00	27.50	30.00	30.00	37.50	37.50	40.00	40.00	32.50	30.00	32.50	35.00	32.50
15.00	17.50	20.00	32.50	25.00	27.50	30.00	30.00	30.00	37.50	37.50	40.00	40.00	32.50	30.00	32.50	35.00	30.00
15.00	17.50	25.00	27.50	30.00	32.50	30.00	32.50	30.00	37.50	37.50	40.00	40.00	32.50	32.50	35.00	37.50	30.00
15.00	17.50	20.00	32.50	25.00	27.50	30.00	30.00	30.00	37.50	37.50	40.00	40.00	32.50	32.50	32.50	35.00	30.00
15.00	17.50	25.00	27.50	30.00	32.50	30.00	32.50	30.00	37.50	37.50	40.00	40.00	32.50	32.50	35.00	37.50	30.00

Рис.7. Распределение параметров определенная по нечетким алгоритмам

1	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2	100.00	99.90	99.87	99.81	99.74	99.71	99.70	99.65	99.56	99.53	99.53	99.59	99.65	99.64	99.61	99.63	99.68
3	100.00	99.71	99.62	99.40	99.27	99.20	99.16	98.97	98.79	98.74	98.76	98.86	98.98	98.88	98.91	99.00	99.15
4	100.00	99.29	98.98	98.48	98.25	98.19	98.12	98.07	98.05	98.06	98.14	98.22	98.30	98.32	98.43	98.54	98.63
5	98.00	98.25	98.07	97.76	97.58	97.55	97.53	97.60	97.68	97.72	97.85	97.91	97.98	98.07	98.28	98.47	98.54
6	97.50	97.50	97.57	97.42	97.28	97.32	97.36	97.46	97.52	97.57	97.79	97.87	97.94	98.02	98.16	98.46	98.50
7	97.50	97.50	97.50	97.43	97.23	97.35	97.38	97.45	97.51	97.61	97.98	98.07	98.12	98.16	98.02	98.50	98.50
8	98.00	98.00	97.50	97.44	97.13	97.32	97.32	97.35	97.40	97.50	98.03	98.08	98.09	98.04	97.50	97.50	97.50
9	97.50	97.50	97.50	97.50	97.00	97.50	97.50	97.50	97.50	97.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50	98.50

Рис.8. Распределение УГВ полученное на нечетко-детерминированной основе

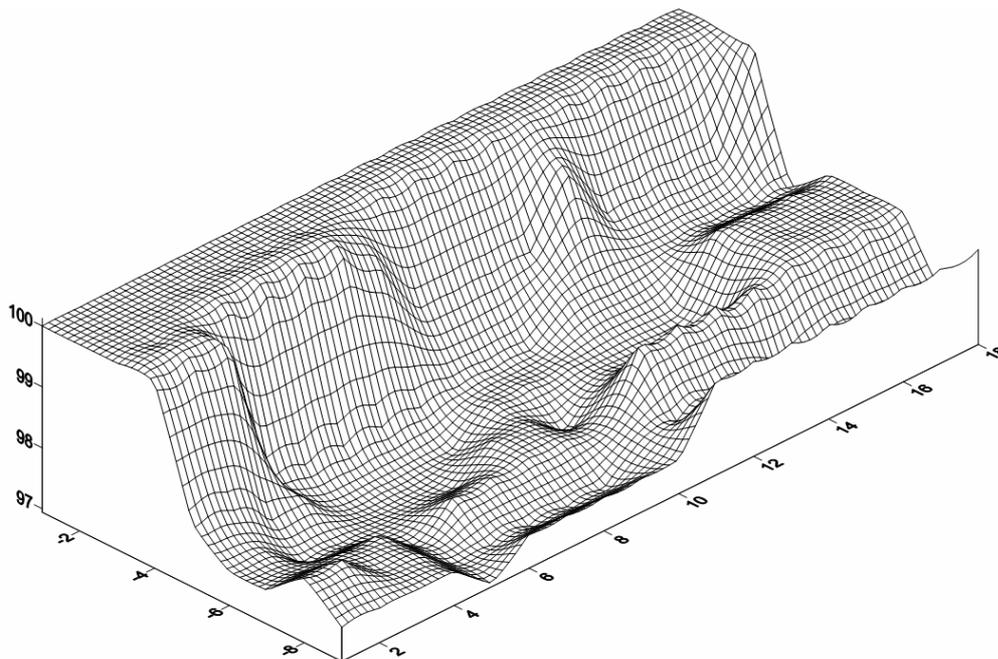


Рис.9. Визуализация результатов решения обратной задачи

## ВЫВОДЫ

1. Предлагается программный комплекс FVARH нечетко-детерминированного моделирования гидрогеологических объектов в условиях однослойного строения водоносного горизонта, основанная на применении локально-одномерной и конечно-разностных методов в виде комплекса программ FVARH на языке C# и дающая возможность интеграции решения задач моделирования и принятия решений в рамках единой вычислительной системе.

2. Структура программного комплекса FVARH включает блоки формирования модели объекта (ГГО), организации вычислительного процесса, формирования информационных моделей ГГО и процесса фильтрации(ИМ ВПВ, ИМ ПФ), принятия решений по ситуациям, балансовым элементам, ситуациям.

3. Решение задачи параметрической идентификации осуществляется на базе формирования информационной модели для определения нечетких значений коэффициентов фильтрации  $\tilde{K} = \tilde{K}(x, y)$  неоднородной в плане ОФ.

4. Формализации нечеткого параметра  $\tilde{K} = \tilde{K}(x, y)$  осуществляется на основе принципов ТНМ, позволяющего представлять лингвистические значения нечеткого параметра  $\tilde{K} = \tilde{K}(x, y)$  в виде нечетких чисел (треугольных, трапецеидальных).

5. Алгоритмы формирования информационно-технологической модели ВПВ информационной модели процесса фильтрации в неоднородной в плане ОФ позволяют организовать взаимосвязь между ВПВ и нечетко-детерминированной моделью ОФ, организовать ВЭ с целью обоснования различных параметров и граничных условий.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] O. Kaleva. Fuzzy differential equations. Fuzzy Sets and Systems, 24(1987), 301-307/.
- [2] O. Kaleva. The Cauchy problem for fuzzy differential equations. Fuzzy sets and systems, 35 (1990), 389-396.
- [3] O.Fazajzadeh. An Explicit Method for Soling Fuzzy Partial Differention Equation. International Mathematical Forum,5,2010,№21,1025-1036.
- [4] Акрамов А.А. Регулирование запасов пресных вод в подземных водохранилищах Средней Азии. - Ташкент: ФАН АН РУз. 1991. – 216 с.
- [5] Акрамов А.А. Технология искусственного восполнения подземных вод на водозаборах Приаралья. – Ташкент: ГПП «Узбекгидрогеология», 1977.–165 с.
- [6] Алтуни А.Е., Семухин М.В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. - Тюмень: Изд-во Тюменского государственного университета, 2000. – 352с.
- [7] Гавич И.К. Методы охраны подземных вод от загрязнения и истощения. – М.: Недра, 1985. – 320 с.
- [8] Ротштейн А.П., Лойко Е.Е., Кательников Д.И. Прогнозирование количества заболеваний на основе экспертно-лингвистической информации //Кибернетика и системный анализ. -1999.-№2.- С.178-185.
- [9] Ротштейн А.П., Кательников Д.И. Идентификация нелинейных объектов нечёткими базами знаний // Кибернетика и системный анализ.-1998.-№5.-С.53-61.
- [10] Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. 2-е изд., испр.-М.: Физматлит, 2005.-300с.-ISBN 5-9221-01-20-х.
- [11] Самарский А.А., Фразинов И.В. О разностных методах аппроксимации задач математической физики // УМН.- Москва, 1976.-Т.31.-С.167-197.
- [12] Усманов Р.Н. К вопросу интеллектуализации нечеткого управления сложных процессов (на примере водозаборов подземных вод) // Вестник ТУИТ. – 2007. - №1. - С. 46-49.
- [13] Усманов Р.Н. К вопросу численного моделирования процессов формирования и эксплуатации водозаборов подземных вод в условиях нечеткой информации // Вестник Таш ГТУ. – Ташкент, 2006 - №2.– С.3-6.

- [14] Усманов Р. Н. Нечеткое моделирование технологических процессов водозабора в системах искусственного восполнения подземных вод// Химическая технология. Контроль и управление. – Ташкент, 2007. - №1.-С. 63-69.
- [15] Усманов Р.Н., Сеитназаров К.К. Обоснование технологических схем водозаборов подземных вод для однослойных пластов в условиях нечеткой исходной информации // Химическая технология. Контроль и управление. № 3/2013. С.-58 – 63.
- [16] Усманов Р.Н., Джуманов Ж.Х., Сеитназаров К.К., Отениязов Р.И. Программный комплекс по информационному и численному моделированию геофильтрационных процессов в однослойных пластах // Свидетельство о депонировании объектов интеллектуальной собственности № 1723,от 12.02.2014.



**Усманов Ришат Ниязбекович** – доктор технических наук, профессор кафедры «Компьютерные системы» Ташкентской университет информационных технологий. Является автором более 100 научных работ. Область научных интересов: искусственный интеллект, компьютерное зрение, ГИС технологии, математическое моделирование, цифровая обработка изображений.

E-mail: [rishat.tuit@mail.ru](mailto:rishat.tuit@mail.ru)



**Сеитназаров Куанышбай Кенесбаевич** – старший научный исследователь кафедры «Компьютерные системы» Ташкентской университет информационных технологий. Является автором более 15 научных работ. Область научных интересов: математическое моделирование, программирование.

E-mail: [Seitnazarov82@mail.ru](mailto:Seitnazarov82@mail.ru)

## Software Complex of Fuzzy-Determined Modeling of Hidrological Objects

R.N. USMANOV, K.K. SEITNAZAROV

*Abstract:* The paper proposes structure of software complex for modeling of geo-filtration processes in plane in the conditions of fuzzy initial information. The questions of fuzzy-determined modeling based on fuzzy formalization of the parameters of water supply points of underground waters are discussed. The results of numerical experiments at the example of monolayer geo-filtration system are produced.

*Key words:* Water supply points of underground waters, fuzzy-determined approach, numerical process, information model, geo-filtration, function of belongings.

# Интегрированная электронная медицинская карта ребенка

Пономарев А.А. Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск  
Меркер Э.С. ООО «Медицинские информационные технологии», Томск

**Аннотация:** В работе рассматривается задача организации единой интегрированной медицинской карты ребенка, которая бы содержала необходимые для своевременной постановки диагноза данные, обеспечивала бы решение социальных задач, возможность использования полученных обобщенных сведений для снижения заболеваемости и пропаганды здорового образа жизни.

**Ключевые слова:** Архитектура, веб сервисы, медицинский документ, мониторинг, высокая нагрузка.

## ВВЕДЕНИЕ

Одна из важнейших и приоритетных задач настоящего времени - создание необходимых условий для сохранения здоровья подрастающего поколения. В Конституции Российской Федерации, в статьях 7, 20, 39, 41 и 42 закреплено право на охрану здоровья граждан, и прежде всего детей. Поэтому одним из важнейших направлений деятельности органов и учреждений здравоохранения в части совершенствования медицинской помощи населению является охрана здоровья, снижение материнской и детской заболеваемости и смерти[1].

В настоящий момент данные о здоровье ребенка собираются из отдельных источников, которые содержат повторяющиеся типы данных, не связанные единой логикой, медицинская документация ведется преимущественно на бумажных носителях. Полученные данные не позволяют в полной мере анализировать вопросы детской заболеваемости, осуществлять прогнозирование и регулирование развития ребенка.

В работе рассматривается проект интегрированной электронной медицинской карты ребенка (ИЭМКР), содержащей информацию о состоянии ребенка от момента рождения до окончания школы. Подключение всех участников процесса, которые создают записи о здоровье ребенка, позволит вести единую базу всего детского населения. Интегрированная электронная медицинская карта ребенка будет содержать совокупность электронных персональных медицинских записей (ЭПМЗ), относящихся к одному ребенку, собираемых и используемых несколькими медицинскими и образовательными учреждениями. Храниться интегрированная электронная медицинская карта ребенка может как централизованно, так и распределенно (в различных учреждениях). При

распределенном варианте хранения доступ к отдельным ЭПМЗ, входящим в ИЭМКР, будет осуществляться через централизованный индекс, содержащий информацию о месте хранения и способе доступа к каждой ЭПМЗ. При таком варианте способы управления ИЭМКР, хранения информации в ней, права доступа и стандарты информационного обмена могут быть определены организациями, создающими ИЭМКР. Общие требования к ИЭМКР могут быть сформулированы в отдельном национальном стандарте. Далее в работе рассматривается вариант организации централизованного хранилища данных, варианты его структуризации и компоненты, определяющие состав такого решения.

## ЖИЗНЕННЫЙ ЦИКЛ ИЭМКР

Создание электронной медицинской карты (ЭМК) ребенка планируется в момент постановки матери на учет в женской консультации, а первой записью является первое подтвержденное ультразвуковое исследование плода.

По существующим правилам на новорожденного ребенка в родильном доме заполняется «Обменная карта родильного дома» (форма № 113/у), которая затем передается в поликлинику по месту жительства. Сведения о прививках заносятся в «Сертификат о профилактических прививках» (форма № 156/у-93), который должен храниться на руках у родителей. В поликлинике оформляется и ведется «История развития ребенка» (форма №112/у), которая тоже содержит данные о прививках. В дальнейшем при поступлении ребенка в детский сад или школу оформляется «Медицинская карта ребенка для школы, школы-интерната, детского дома, детского сада, яслей/сада» (форма № 026/у). Форма 026/у также содержит раздел о проведенной иммунизации ребенка. Информация о вакцинации должна заполняться также в форму «Карта профилактических прививок» (№063/у). Часто данные в «Сертификате о профилактических прививках», «Истории развития ребенка», Форме №26/у и «Карте профилактических прививок» не совпадают друг с другом. А в случае потери «Сертификата о профилактических прививках», его сложно восстановить, так как данные о здоровье ребенка заносятся в разных учреждениях в разное время и людьми с разным уровнем ответственности и компетенции. При смене учреждений, переезде ребенка, перехода из

одного возрастного периода в другой – данные теряются, искажаются и дублируются.

Идентифицируется карта персональными данными матери и текущей беременностью. До момента рождения все исследования и записи в медкарте, сделанные матери, дублируются в медкарте ребенка. После рождения ЭПМЗ матери и ребенка разделяются, и данные о ребенке заносятся в индивидуальную электронную медицинскую карту ребенка. Карта идентифицируется дополнительно местом, датой и временем рождения ребенка. В дальнейшем карта дополняется информацией об имени, фамилии, отчестве, медицинском полисе и т.д. Все сведения о рождении, прививках, проведенном лечении в родильном доме фиксируются в ЭМК и в дальнейшем доступны врачам поликлиники по месту жительства. При выписке из родильного дома родителям выдаются идентификатор электронной медицинской карты ребенка, который позволит просматривать записи в ИЭМКР. Вся стандартная бумажная документация может формироваться автоматически. В дальнейшем лечебно-профилактические учреждения, детские дошкольные и школьные учреждения также могут непосредственно заносить данные обследований и иммунизации в ЭМК ребенка. Сведения, касающиеся паспортной части, социально-бытовых условий могут заноситься родителями ребенка.

При наличии в лечебно-профилактическом учреждении медицинской информационной системы, позволяющей вести ЭМК, данные осмотров, исследований, иммунизации ребенка будут экспортироваться в существующую ИЭМКР, в случае ее отсутствия – заноситься непосредственно в ИЭМКР.

Ведение ИЭМКР позволяет вносить подробные сведения о ребенке, выводить данные в различных срезах и способах представления информации:

- Особенности внутриутробного развития.
- Особенности рождения.
- Особенности развития первого и последующих лет жизни.
- Характер питания.
- Уровень нервно-психического развития на каждом этапе.
- Уровень физического развития на каждом этапе.
- Вакцинации.
- Перенесенные острые заболевания.
- Травмы.
- Наличие хронических заболеваний.
- Госпитализации.
- Операции.
- Гемотрансфузии.
- Аллергические реакции.
- Антропометрические данные.
- Профилактические наблюдения.
- Диспансерные наблюдения.

- Лабораторные и инструментальные исследования.
- Назначаемое лечение.
- Учет принимаемых антибиотиков.
- Санаторно-курортное лечение.
- Учет рентгенологических исследований.
- Группа здоровья.
- Группа для занятий физической культурой и т.д.

Таким образом, ведение ИЭМКР позволит проводить анализ данных о детском населении по всем критериям медицинской карты. Последовательное заполнение данных всеми учреждениями, участвующими в оценке здоровья и лечении ребенка, позволит иметь полноценную базу для анализа и принятия решений врачами, устранит недостатки, связанные с потерей медицинских данных, сведений о прививках, перенесенных заболеваниях и т.д. Позволит непосредственно выводить данные анамнеза жизни, а не собирать его со слов родителей для каждого случая заболевания. Стандартизация типов и классов ЭПМЗ позволит всем участникам, заполняющим данные в медицинскую карту ребенка, анализировать развитие ребенка по мере его взросления.

Отличительной особенностью предложенного подхода является использование формата OpenUMS при определении состава учетных материалов, что при соответствующей настройке позволяет решать и дополнительные задачи. К таким задачам можно отнести регистрацию спортивных и иных достижений, что позволит более комплексно рассматривать физическое состояние ребенка, а в общем случае позволит выполнять мониторинг одаренных ребят для формирования спортивного резерва. В последующем ИЭМКР переходит в разряд ЭМК взрослого и может найти дополнительное применение, например для задач министерства обороны и МЧС.

### ХРАНИЛИЩЕ ДАННЫХ

С целью оптимальной формализации различных типов медицинских данных по их хранению, передачи и дальнейшей обработки с учетом особенностей развития медицинской науки на базе русской медицинской используется формат по созданию медицинских документов Open UMS [2]. Концепция построения электронных медицинских документов позволяет учитывать особенности принятой в русской медицинской школе модели синтеза и анализа медицинских данных и сочетать ее с международными стандартами в области хранения и передачи медицинских данных. Концепция включает 4 уровня (рис. 1): модель базовых понятий, модель структуры, модель отображения, визуальный интерпретатор [3].

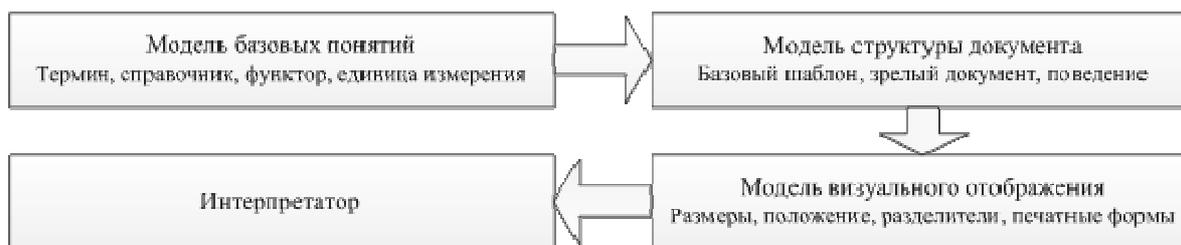


Рис. 1. Модель построения электронного медицинского документа

Модель структуры можно определить как набор правил формализации данных для структурирования части ЭПМЗ 7.1.9 «Формализованные данные, прикрепленные к ЭПМЗ» (ГОСТ Р 52636-2006 Электронная история болезни). В целях стандартизации обмена данными основные классы модели OpenUMS приводятся в соответствие с классами ISO 13606-1:2008 Electronic health record communication -- Part 1: Reference model. Технологии SaaS (облачные сервисные технологии), предлагаемые Министерством здравоохранения РФ, позволяют объединить все данные и представить их в виде сервисов, которые будут доступны всем участникам процесса развития ребенка.

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА

С учетом необходимости организации масштабированного решения для обеспечения работы в режиме высокой нагрузки была разработана следующая схема (см. рис. 2), обеспечивающая возможность горизонтального масштабирования за счет включения дополнительных узлов: сервер базы данных, сервер приложений.

Если в случае добавления нового сервера приложений необходимо внести небольшие изменения в файл конфигурации маршрутизатора, то в случае дополнительно узла-сервера БД большая часть работ решается штатными средствами системы

Представленная схема включает в себя пять основных компонентов:

1. Сервер приложений
2. Frontend Web сервер
3. Сервер БД
4. Мобильные приложения индивидуального использования
5. Модуль Аналитической отчетности

Сервер приложений реализует всю необходимую бизнес логику работы информационной системы. Функционал представляет собой совокупность веб сервисов, реализованных с использованием архитектуры REST, обеспечивающих организацию

защищенного медицинского документооборота.

Frontend веб сервер обеспечивает пользовательский интерфейс веб приложения для работы с сервисами сервера приложений.

БД представляется кластером сервером MSSQL и решает задачи хранения содержательной части медицинских документов и некоторой служебной информации.

Мобильные приложения, также как и Frontend используют сервисы, предоставляемые сервером приложений и обеспечивают пользовательский интерфейс, используя возможности операционной системы мобильного устройства. Благодаря компактности таких устройств и наличию различных беспроводных интерфейсов появляется возможность использования различных устройств, позволяющих выполнять мониторинг различных медицинских показателей здоровья и физической активности и в оперативном режиме заполнять такими сведениями соответствующие разделы ИЭМКР.

Одной из главных задач обеспечения приемлемого отклика системы является территориальное распределение элементов системы, за счет чего достигается снижение временных издержек на передачу трафика. Маршрутизация пользовательских запросов по территориальному признаку с учетом нагрузки на сервер выполняется балансировщиком нагрузки, который является дополнительным компонентом системы, при этом задача маршрутизации пользователя в зависимости от типа используемых устройств может быть решена различным способом. В первом случае можно использовать служебную информацию HTTP с последующим использованием геолокационных БД GeoIP [4,5], для вариантов с использованием смартфонов и планшетных устройств возможно применение дополнительного способа определения географического положения с использованием возможностей GPS датчиков. Второй способ является предпочтительным с точки зрения характеристик быстродействия и оптимизации трафика.

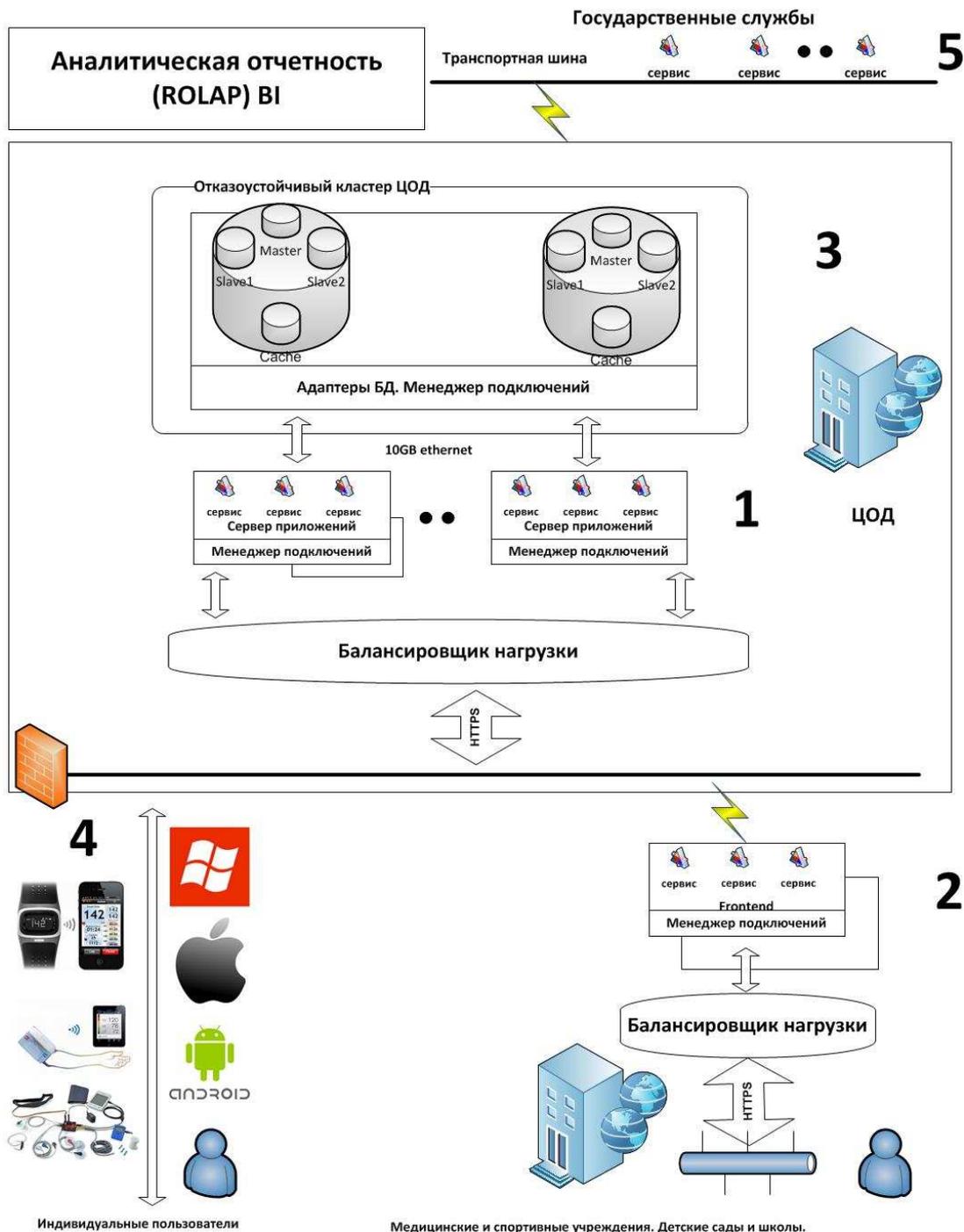


Рис. 2. Структурная схема ИС

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных мероприятий достигается решение поставленной задачи, позволяющей осуществлять наполнение, хранение и работу с данными, составляющими ИЭМКР. Для организации ввода медицинских данных в формате, пригодном для дальнейшего анализа и систематизации необходимо провести тщательную работу по подготовке справочника показателей в формате Open UMS. В результате такой работы формируется состав медицинских и других документов, подлежащих учету внутри системы. За счет расширения состава таких

документов появляется возможность комплексного использования полученных материалов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дипломная работа: Государственная политика в области охраны здоровья матери и ребенка Эл. Ресурс [\[http://bestreferat.ru/referat-108495.html\]](http://bestreferat.ru/referat-108495.html) (дата обращения: 23.04.2014).
- [2] OPEN UMS – Новый российский открытый формат медицинских документов Матеріали VII міжнародної конференції Abstracts of the VII International Conference "Telemedicine-Experience&Prospects" Український журнал

телемедицини та медичної телематики /  
Донецьк, 2011 Том 9 №1 2011 с. 11-12

- [3] Проектирование и реализация региональной медицинской информационной системы с применением облачных вычислений. Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО, 2013. - т. - № 3. - с. 172-175
- [4] GeoLite Free Downloadable Databases Эл. Ресурс  
[\[http://dev.maxmind.com/geoip/legacy/geolite/\]](http://dev.maxmind.com/geoip/legacy/geolite/)  
(дата обращения: 23.04.2014).
- [5] Bringing Location to the Internet Эл. Ресурс  
[\[http://www.ip2location.com/developers.aspx\]](http://www.ip2location.com/developers.aspx)  
(дата обращения: 23.04.2014).

**Пономарев Алексей Анатольевич** - к.т.н.,  
доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем  
института кибернетики Национального Исследовательского  
Томского политехнического университета.

Эл. почта: [aaponomarev@tpu.ru](mailto:aaponomarev@tpu.ru).

**Меркер Эдуард Степанович** - пластический хирург,  
врач высшей категории, директор ООО «Медицинские  
информационные технологии».

Эл. почта: [merker@yandex.ru](mailto:merker@yandex.ru)

## **Integrated Electronic Medical Records of the Child**

Alexey PONOMAREV, Eduard MERKER

*Annotation:* The problem of the organization of a single, integrated child health card, which would contain necessary for timely diagnosis data, would provide the solution of social problems, possibility of using the generalized information to reduce morbidity.

*Key words:* architecture, web services, medical document, monitoring, high load.

### **Authors:**

Alexey Anatolievich PONOMAREV

PhD, Assistant Professor of the Department of Automatics and Computer Systems Institute of Cybernetics National Research Tomsk Polytechnic University.

E-mail: [aaponomarev@tpu.ru](mailto:aaponomarev@tpu.ru)

Eduard Stepanovich MERKER

Plastic surgeon. Doctor of the highest category.

CEO of LLC «Medical information technology»

Email: [merker@yandex.ru](mailto:merker@yandex.ru)

# Программное обеспечение для определения индексов каузальности линейных вход-выходных динамических систем

А. М. Малышенко, Е. А. Рыбаков, Е. А. Кочеткова

Национальный исследовательский Томский политехнический университет

**Аннотация:** Определена сущность свойства каузальности вход-выходных систем, указана его квалиметрия с использованием индексов каузальности. Приведены сведения о расчете этих индексов системы по ее матрицам смежности и достижимости, а также с использованием программного обеспечения, разработанного авторами для случая линейных динамических систем, процессы в которых описываются математическими моделями с непрерывным и дискретным временем.

**Ключевые слова:** линейная вход-выходная динамическая система, система автоматического управления, каузальность, индексы каузальности, определение, расчет, программный комплекс.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

**Каузальность** (лат. – *causalis*, англ. – *causality*) относится к числу основополагающих понятий философии и выполняет важную методологическую роль в научном познании и описании физического мира. Она означает причинно-следственную связь, причинную взаимообусловленность процессов, событий во времени, при которой воздействие одного объекта (причина) приводит к соответствующему ожидаемому изменению другого объекта (следствие). При этом будущее течение многих процессов оказывается зависящим не только от настоящего времени, но и существенно зависит от их предыстории.

В математике строгое определение (дефиниция) свойства каузальности введено для характеристики используемых в ней операторов отображения одних множеств на другие лишь в 1960-х годах, в то время как ее суть уже давно используется в математических моделях, описывающих реальные процессы. Строгое определение каузального оператора дано, в частности, в [1]: оператор  $A$  каузален, если при  $\forall t \in R$  имеет место включение  $AX_t \subseteq Y_t$ , где  $X_t = \{x \in X : x(s) = 0 \quad \forall s < t\}$  и  $Y_t = \{y \in Y : y(s) = 0 \quad \forall s < t\}$ .

На необходимость учета свойства каузальности в общей теории систем впервые было указано в [2]. Ныне в теории систем ввиду разнообразия свойства каузальности у вход-выходных систем последние принято относить к трем классам: строго каузальным, каузальным,

некаузальным (антикаузальным), характеризуемым в последнем случае операторами без памяти [3–5]. Необходимо заметить, что терминология в этой части еще не устоялась. В частности, строго каузальные системы и каузальные системы в [6–8] называются, соответственно, *каузальными* и *бикаузальными*, а в [9, 10] – *строго собственными* и *собственными*.

Свойство каузальность отражает факт запаздывания при распространении сигналов от входа к выходу системы. Оно присуще любой системе, обладающей инерционностью, и дополнительно характеризует её. Управляемые объекты и системы, к которым относятся, в частности, системы автоматического управления (САУ), в зависимости от того, в какой мере они обладают указанным свойством, могут быть разделены на 3 вышеуказанных класса: *некаузальные*, *каузальные* и *строго каузальные* [11–15].

Некаузальными являются вход-выходные системы, которые не обладают инерционными свойствами, т. е. такие системы, вход-выходные отображения в которых определяются только алгебраическими и/или логическими операторами без памяти.

В ряде частных случаев отличить каузальные системы от строго каузальных можно непосредственно по виду их математических моделей. С этой целью воспользуемся для описания процессов в динамических системах моделью типа «вход–состояние–выход» вида

$$\sigma x(t) = Ax(t) + Bu(t) + Hf(t), \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) + Ff(t). \quad (2)$$

Полагаем, что в ней  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ ,  $f \in R^r$  и  $y \in R^p$  – соответственно, векторы состояния, полезного входа (для систем автоматического управления – управляющего воздействия), возмущения и выхода системы. Составляющая  $\sigma x(t)$  для непрерывных систем означает первую производную по времени от  $x(t)$ , а для систем с дискретным аргументом (относительным временем  $t$ , значения которого кратны периоду дискретизации  $T_0$ ) эта составляющая равна  $x(t+1)$ .

Система с моделью (1), (2) строго каузальна по входу  $u(t)$  лишь в том случае, когда выход

$y(t)$  в (2) не зависит от  $u(t)$ . В противном случае она каузальна. Это значит, что у каузальной системы выход  $y(t)$  формируется за счет преобразования  $u(t)$  и по инерционному, и по безинерционному каналам связи, а в строго каузальной системе – только после прохождения сигнала  $u(t)$  через инерционную часть системы. Аналогично следует считать систему (1), (2) строго каузальной по возмущению  $f(t)$ , если в (2)  $F \equiv 0$ . В противном случае, если при этом  $H \neq 0$ , данная система по возмущению  $f(t)$  каузальна.

Каузальность вход-выходных динамических систем правомерно отнести к фундаментальному их свойству, как и хорошо уже известные свойства устойчивости, а также управляемости, наблюдаемости, достижимости и восстанавливаемости (УНДВ). И если устойчивость систем является объектом исследования уже примерно полтора столетия, а УНДВ – около полувека, то каузальность систем еще не достаточно хорошо изучена. В то же время она также определяет потенциальные свойства вход-выходных систем, а ее количественные меры могут быть целенаправленно использованы при разработке многих объектов и систем различного назначения. В частности, информация о количественных характеристиках каузальности объектов управления может быть эффективно использована для выявления структуры внутренних вход-выходных взаимосвязей объектов, при решении задач схемотехнического проектирования для них систем автоматического управления, при оценке функциональной воспроизводимости и самих объектов управления, и системы автоматического управления в целом.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНДЕКСОВ КАУЗАЛЬНОСТИ

Согласно введенному в [14] определению в динамических системах с моделью типа «вход–состояние–выход» вида

$$\sigma x(t) = g(x(t), u(t)); \quad (3)$$

$$y(t) = h(x(t), u(t)). \quad (4)$$

с теми же обозначениями, что и в (1), (2), и начальным состоянием

$$x(0) = 0; \quad y(0) = 0 \quad (5)$$

**индекс каузальности  $k_{ij}^u$  системы по выходу  $y_i$ ,  $i \in \overline{1, p}$  и входу  $u_j$ ,  $j \in \overline{1, m}$**  – это наименьшее целое  $t$ , для которого при начальном состоянии (5)

$$\frac{\partial}{\partial u_j} (h_i \circ g^t) \neq 0. \quad (6)$$

В этом определении использованы

следующие обозначения и допущения:  $h_i(\cdot)$  –  $i$ -я строка вектор-функции  $h(\cdot)$ ; вектор-функции  $g: R^n \times R^m \rightarrow R^n$ ;  $h: R^n \times R^m \rightarrow R^p$  – гладкие, удовлетворяющие условиям  $g(0, 0) = 0$ ,  $h(0, 0) = 0$ ;  $x_0 = x(0)$ ;  $u_v = u(v)$ ;  $g^v = g(g(\dots(g(g(x_0, u_0), u_1), u_2), \dots), u_{v-1}))$ .

При этом  $h \circ g^v$  – однозначное (сюрьективное) вход-выходное отображение системы на интервале  $0 \leq t \leq v$ .

**Индекс каузальности**

$k_i^u$  рассматриваемой системы по выходу  $y_i$  от всего входа  $u$  – это наименьшее целое  $t$ , для которого при начальном состоянии (5)  $\nabla^u (h_i \circ g^t) \neq 0$ . В этом выражении и далее  $\nabla^u (T)$  означает градиент  $T$  по  $u$ . Наконец, индекс каузальности  $k_c$  рассматриваемой системы по управлению – это наименьшее целое  $t$ , для которого при начальном состоянии (5)

$$\nabla^u (h \circ g^t) \neq 0.$$

При таком определении каузальность рассматриваемых систем характеризуется матрицей индексов каузальности

$K^u = [k_{ij}^u]_{pm}$ . При этом

$$k_i^u = \min \{ k_{ij}^u : j \in \overline{1, m} \}. \quad (7)$$

$$k^u = \min \{ k_{ij}^u : i \in \overline{1, p}, j \in \overline{1, m} \}. \quad (8)$$

Если у объекта управления  $k_{ij}^u = 0$ , то это значит, что его выходная переменная  $y_i$  начинает меняться одновременно с началом изменения  $u_j$ ,  $j \in \overline{1, m}$ , т. е. между ними существует не только инерционный, но и безинерционный каналы связи. В ситуациях, когда управление  $u_j$  не влияет на  $y_i$ , считаем, что индекс каузальности  $k_{ij}^u = \infty$ .

Если анализируемая система подвержена не только входным воздействиям  $u(t)$ , но и возмущениям  $f \in R^r$ , так что ее модель в форме «вход–состояние–выход» имеет вид

$$\sigma x(t) = g(x(t), u(t), f(t));$$

$$y(t) = h(x(t), u(t), f(t)),$$

то и связь выхода системы  $y(t)$  с возмущением  $f(t)$  можно характеризовать матрицей индексов каузальности  $K^f = [k_{ij}^f]_{pr}$ , определяемой аналогичным способом.

Если анализируемая вход-выходная система непрерывна, то  $k_{ij}^u$  рассматриваемой системы по выходу  $y_i$  от всего входа  $u_j(t)$  – это

наименьшая производная по времени выходной переменной  $y_i(t)$ , которая начинает меняться одновременно с началом изменения  $u_j(t)$ .

Для линейной вход-выходной динамической системы с моделью (1), (2) определение индексов каузальности может производиться либо по диграфу этой системы, либо с использованием ее матриц достижимости [13].

Процедура вычисления индексов каузальности по **матрицам достижимости**, формируемым из **матрицы смежности** системы. Последняя для систем с вход-выходной моделью (1), (2) при  $f(t) \equiv 0$  – это квадратная булева матрица размера  $\alpha \times \alpha$ , где

$$SN = [s_{ij}]_{\alpha\alpha} = \left( (I_\alpha + E)^N \right)^* = \left( (S1)^N \right)^*, \quad (10)$$

где  $I_\alpha$  – единичная  $\alpha \times \alpha$  матрица, а символ «\*» означает, что соответствующие преобразования выполняются по правилам двоичной (булевой) арифметики. При этом если в  $SN$  элемент  $s_{ij} = 1$ , то это означает, что от вершины  $V_j$  к вершине  $V_i$  в диграфе системы имеется минимум один маршрут длины  $N$ , т. е. состоящий из  $N$  дуг. При  $s_{ij} = 0$  такие маршруты отсутствуют.

Если матрицы достижимости  $SN$  системы с моделью вида (1), (2), определенные согласно (10), представить в виде

$$SN = \begin{bmatrix} SN_{nn} & \dots & SN_{nm} & \dots & 0_{np} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0_{mn} & \dots & I_{mm} & \dots & 0_{mp} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ SN_{pn} & \dots & SN_{pm} & \dots & I_{pp} \end{bmatrix},$$

то индексы каузальности системы будут определяться блочными матрицами  $SN_{pm}$ ,  $N = \overline{1, n}$ . В частности, индекс каузальности системы по входу  $u_j$  и выходу  $y_i$  определяется как

$$k_{ij} = q - 1,$$

где  $q$  – наименьшая степень в  $SN = \left( (S1)^q \right)^*$ , при которой в матрице  $SN_{pm}$  ( $i, j$ )-ый элемент равен единице. Индексом каузальности  $k_i$  системы по выходу  $y_i$  будет уменьшенное на единицу значение  $q$ , при котором в  $i$ -й строке  $SN_{pm}$  впервые появится отличный от нуля элемент, а индексом каузальности всей системы в целом – уменьшенное на единицу значение  $q$ , при котором в  $SN_{pm}$  впервые появится отличный от нуля элемент. Если же во всем множестве  $SN_{pm}$ ,  $N = \overline{1, n}$  какой-либо ( $i, j$ )-ый элемент остается равным нулю, то это означает, что любое изменение входного воздействия  $u_j$  не приводит к изменениям выходной переменной  $y_i$  системы. В таком

$\alpha = n + m + p$ , вида

$$E = \begin{bmatrix} \overline{A}_{nn} & \dots & \overline{B}_{nm} & \dots & 0_{np} \\ 0_{mn} & \dots & 0_{mm} & \dots & 0_{mp} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{pn} & \dots & D_{pm} & \dots & 0_{pp} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Индексы в (9) указывают на размерность соответствующих блочных матриц, например,  $\overline{B}_{nm}$  – матрица размерности  $m \times n$ . В случае, когда в (3)  $D = 0$ , вместо матрицы  $\overline{D}_{pm}$  в (9) вводится нуль-матрица  $0_{pm}$ .

Матрицы достижимости  $SN$ ,  $N \in \overline{1, n}$  для рассматриваемого класса систем определяются как

случае соответствующий этой вход-выходной связи индекс каузальности  $k_{ij}$  следует принять равным бесконечности.

### 3. КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА CAUSALITY

Компьютерная программа **Causality** [16] – это программа для расчёта индексов каузальности линейных вход-выходных динамических систем. Данная программа значительно сокращает временные затраты на этапе расчета индексов каузальности системы. В качестве ее результата получается матрицы индексов каузальности системы по управлению и по возмущению. Также эта программа предоставляет возможность просмотреть промежуточные результаты – матрицы смежности и достижимости.

Внешний вид основного рабочего окна программы для расчета индексов каузальности линейных динамических систем с математической моделью (1), (2) представлен на *рис. 1*.

В окне программы **Causality** имеют следующие области и кнопки:

**Выбор режима** – выбор соответствующего типа системы;

**Размерности** – задание размерности векторов входа, выхода и управления (возмущения);

**Анализируемая система** – представление вида модели анализируемой системы и выбор матриц параметров для их задания;

**Ввод** – область ввода матриц  $A$ ,  $B$  и  $C$ ,  $D$  ( $H$ ,  $F$ );

**Матрица  $K$  индексов каузальности системы** – область просмотра результатов расчета матрицы индексов каузальности анализируемой системы;

**Выбор матрицы** – область выбора матрицы смежности или достижимости для просмотра промежуточных результатов;

**Матрица смежности  $E$**  – область

демонстрации результата расчета матрицы смежности анализируемой системы;

**Матрица достижимости SN** – матрицы смежности,  $N=1,2,3\dots$ ;

**Запись** – кнопка для записи матриц системы;

**Рассчитать** – кнопка для расчета индексов каузальности системы;

**Показать** – кнопка для открытия окна просмотра промежуточных результатов (рис. 2);

**Скопировать** – кнопка, позволяющая скопировать результат в буфер.

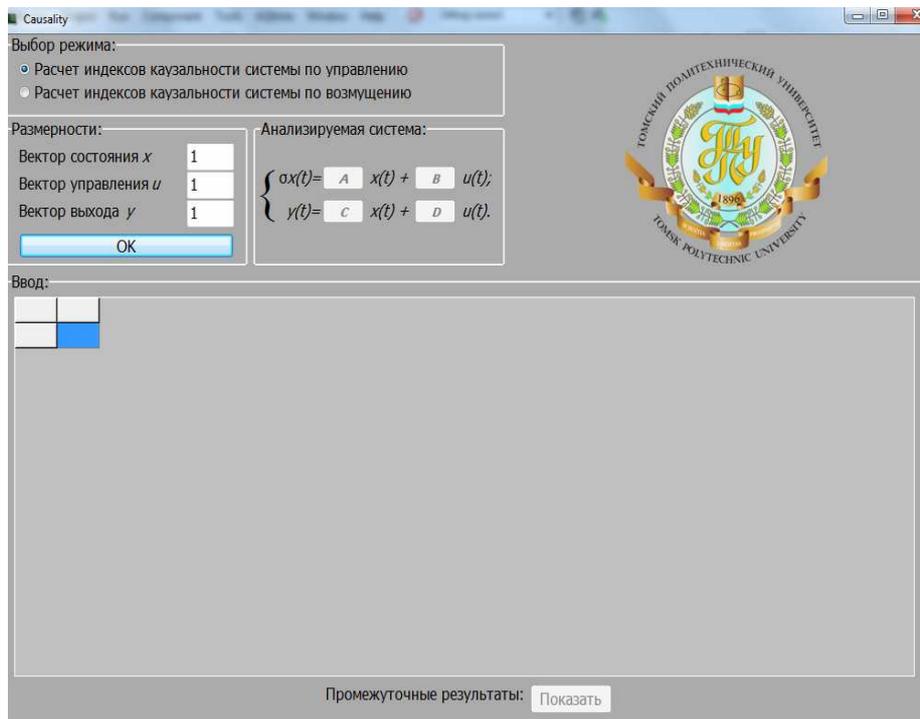


Рис. 1. Основное рабочее окно программы **Causality** для расчета индексов каузальности линейных вход-выходных динамических систем

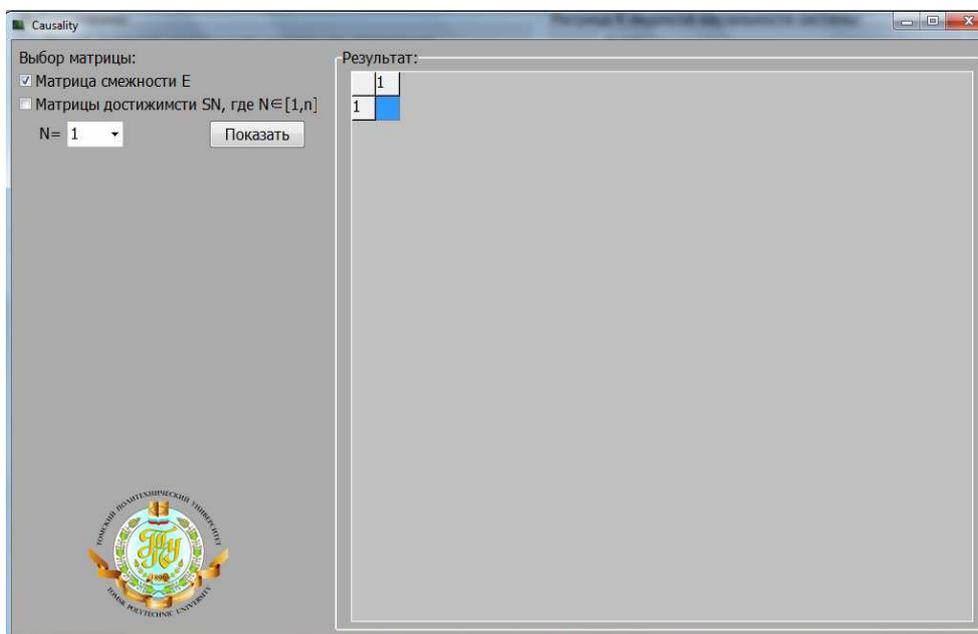
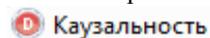


Рис. 2. Окно просмотра промежуточных результатов

Для расчета индексов каузальности системы необходимо выполнить следующие действия.

1. Запустить программу для расчета индексов каузальности линейных динамических систем **Casuality** двойным кликом

иконки приложения данной программы



2. В открывшемся диалоговом окне (рис. 1) в области **Выбор режима** (рис. 3) отметить тип расчета индексов каузальности

системы (по управлению или по возмущению)

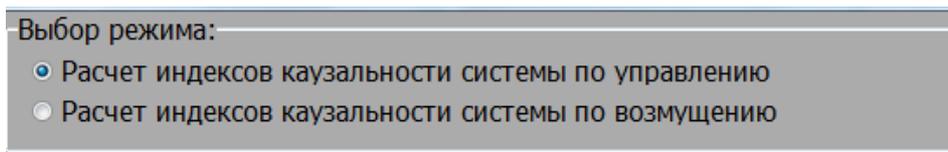


Рис. 3. Области выбора режима расчета

В зависимости от выбранного режима задания параметров анализируемой системы (рис. 4).

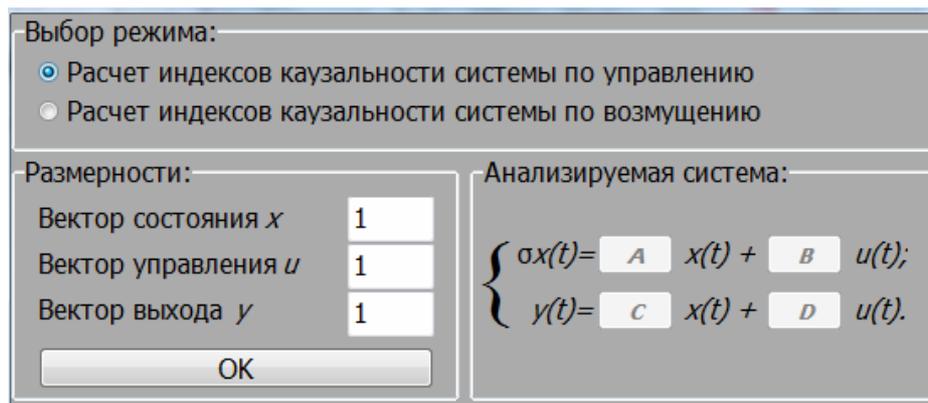
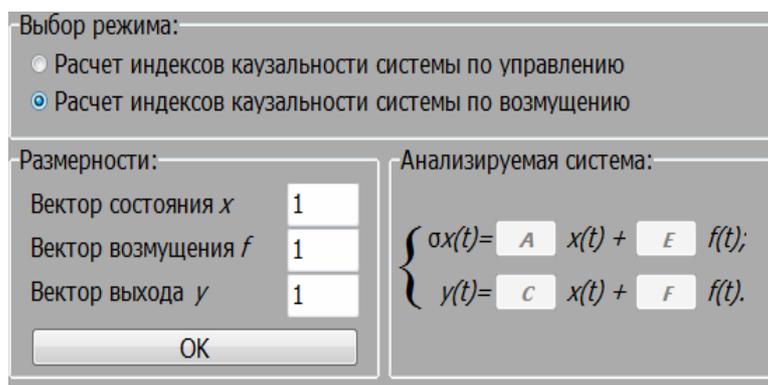


Рис. 4. Вид рабочих окон для задания размерностей переменных системы в соответствии с выбранным режимом расчета

- Задать размерности векторов переменных входа, состояния и выхода системы (рис. 5)

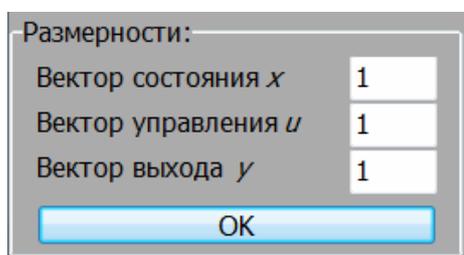


Рис. 5. Область задания размерности векторов состояния, входа и выхода системы

- Задать матрицы параметров системы. Для этого:
  - выбрать соответствующую матрицу  $A$ ,  $B$ ,  $C$  или  $D$  (рис. 6);

и нажать **ОК**. По умолчанию размерности этих векторов будут заданы единичными.

- вписать только ненулевые элементы формируемой матрицы, так как по умолчанию матрица нулевая (рис. 7);
- сохранить записываемую матрицу нажатием кнопки **Записать**, которая находится в правом нижнем углу окна.

После задания матрицы цвет ее написания в рабочем окне для ввода матриц  $A$ ,  $B$  и  $C$ ,  $D$  ( $H$ ,  $F$ ) анализируемой системы изменится с красного на зеленый.

Таким образом задаются все матрицы системы. Если какая-либо матрица у системы нулевая, то следует сохранить ее нулевой.

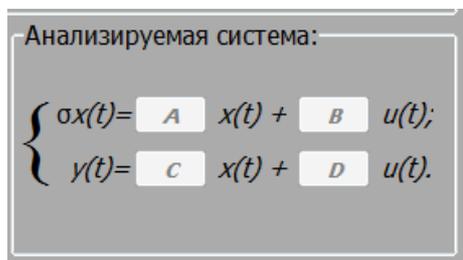


Рис. 6. Рабочее окно для ввода матриц  $A$ ,  $B$  и  $C$ ,  $D$  ( $H$ ,  $F$ ) анализируемой системы

5. Произвести расчет определяемой матрицы индексов каузальности системы (по полезному входу или возмущению). Для этого достаточно кликнуть на кнопку **Рассчитать**, которая появится в левом нижнем углу окна программы после задания всех необходимых для такого расчета матриц (рис. 8).

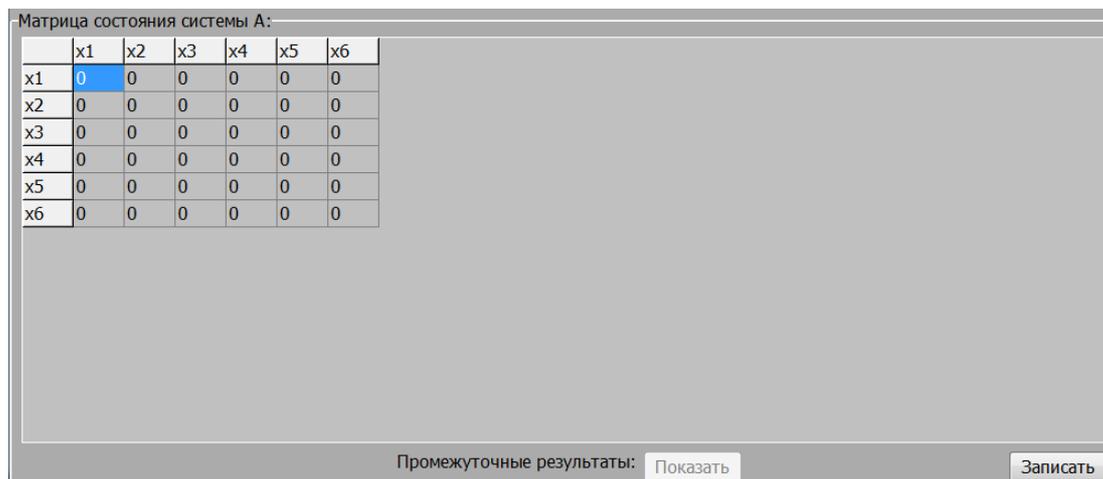


Рис. 7. Область задания элементов матриц системы

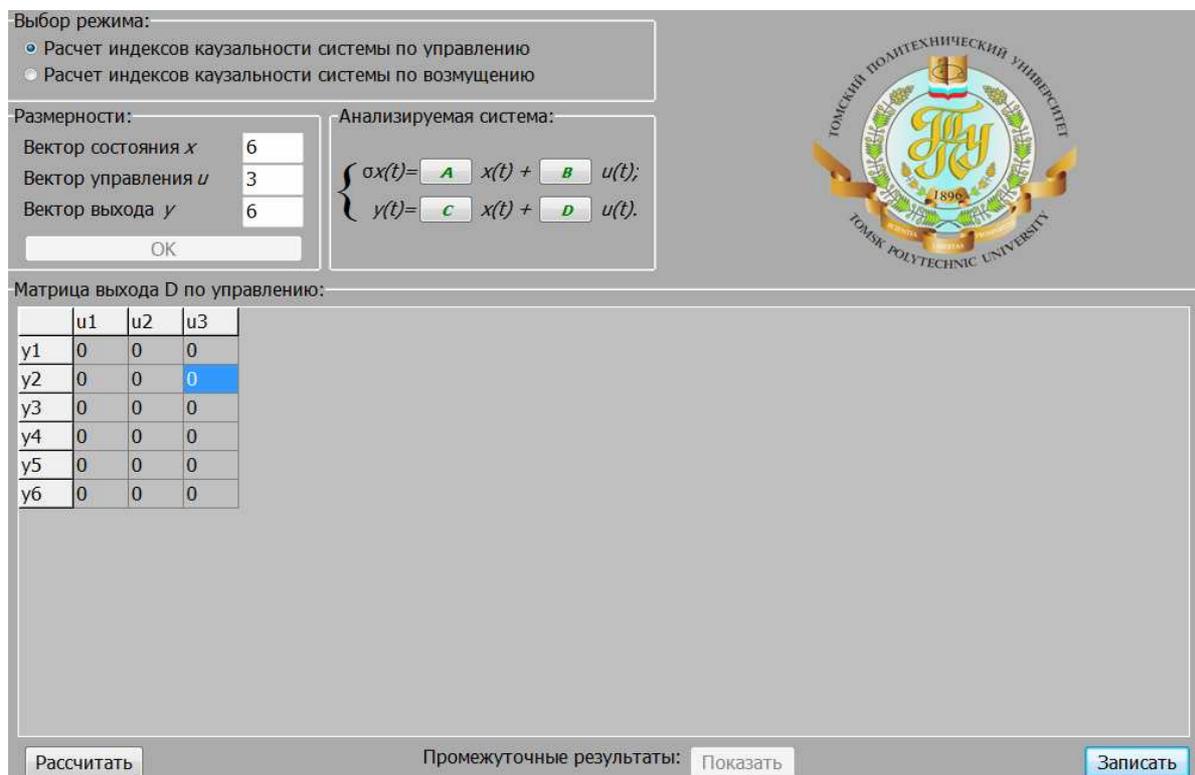


Рис. 8. Окно программы после задания матриц системы

В окне программы в левом верхнем углу появится область, где будет выведен результат расчета матрицы индексов каузальности системы (рис. 9). Данную матрицу можно

скопировать (нажатие кнопки **Скопировать**) в буфер для дальнейшего использования в текстовом документе.

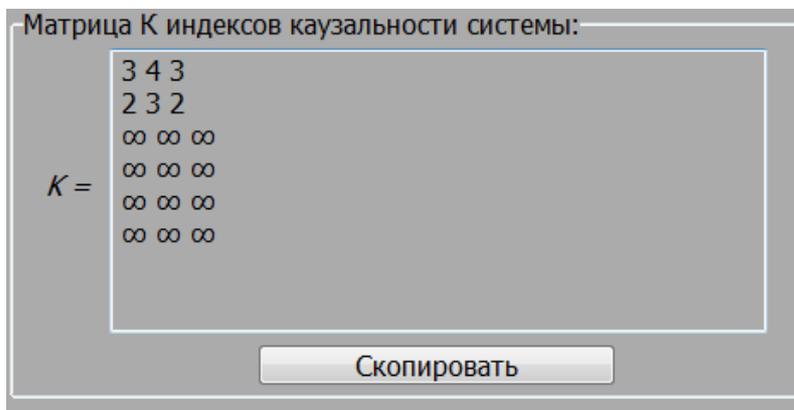


Рис. 9. Область демонстрации вычисленной матрицы индексов каузальности системы

6. Просмотр промежуточных результатов  
 Для открытия окна просмотра промежуточных результатов следует нажать кнопку **Показать**, расположенную в центре рабочего окна программы (рис. 10, 11).

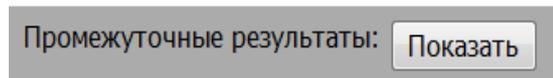


Рис. 10. Кнопка для открытия окна демонстрации промежуточных результатов

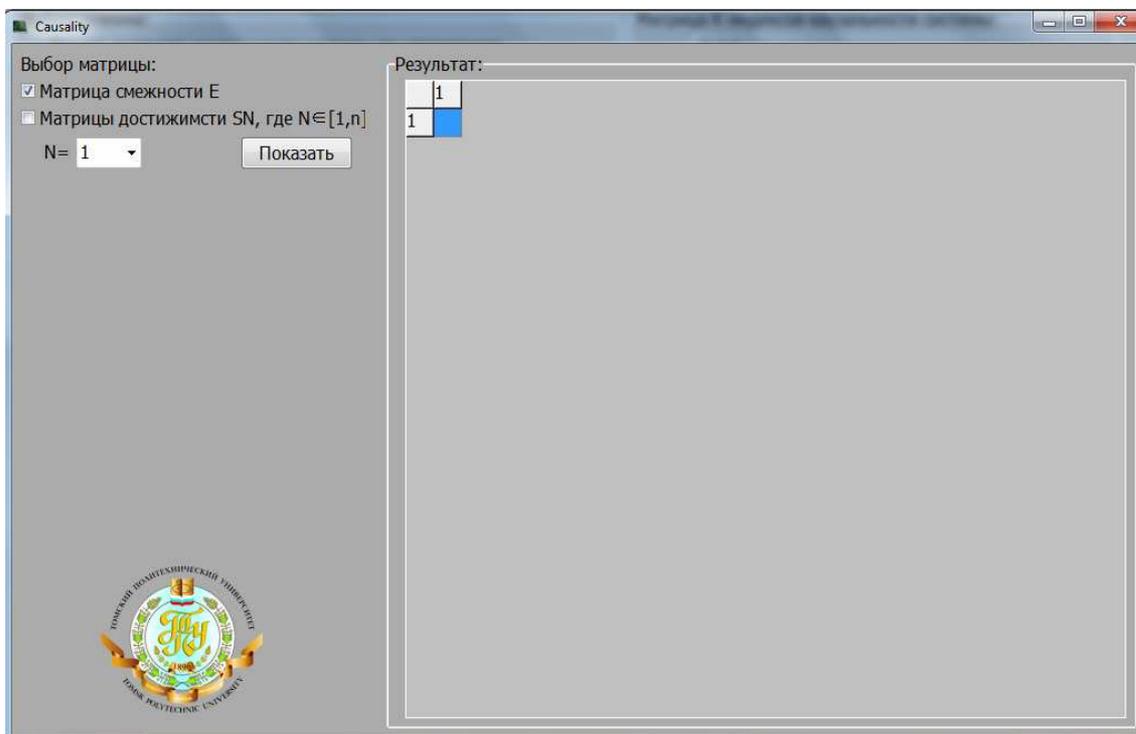


Рис. 11. Окно демонстрации промежуточных результатов

Промежуточными результатами для просмотра могут быть матрицы смежности и достижимости. Для просмотра матрицы смежности  $E$  в области **Выбор матрицы** следует выбрать ее, отметив галочкой, и нажать кнопку **Показать**. В левой области открытого диалогового окна отобразится матрица смежности данной системы. Для просмотра матрицы достижимости  $SN$  в области **Выбор матрицы** следует выбрать ее, отметив галочкой, после чего задать значение  $N$ , путем выбора значения из выпадающего меню, и нажать кнопку **Показать**. В левой области открытого диалогового окна отобразится матриц достижимости данной системы для заданного значения  $N$ .

#### 4. ПРИМЕР РАСЧЕТА МАТРИЦЫ ИНДЕКСОВ КАУЗАЛЬНОСТИ

Рассчитаем матрицу индексов каузальности для линейной динамической системы по управлению для системы с математической моделью (1), (2), у которой:

$$A = \begin{bmatrix} 5 & 0 & 39 \\ 9 & 11 & 0 \\ 0 & 75 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 12 & 0 & 46 \\ 0 & 456 & 0 \\ 8 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$C = \begin{bmatrix} 30 & 0 & 0 \\ 152 & 0 & 54 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 46 & 5 \\ 3 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Задаем режим работы (рис. 12). Вводим

размерности (рис. 13). Вводим матрицы системы (рис. 14)

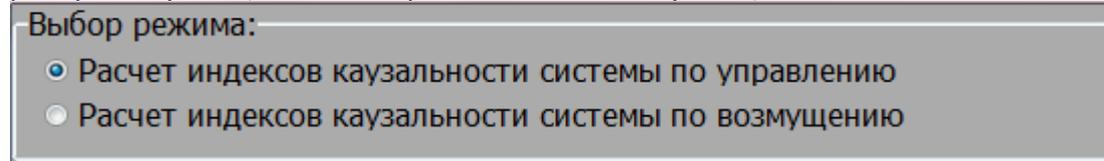


Рис. 12. Выбран режим работы по управлению

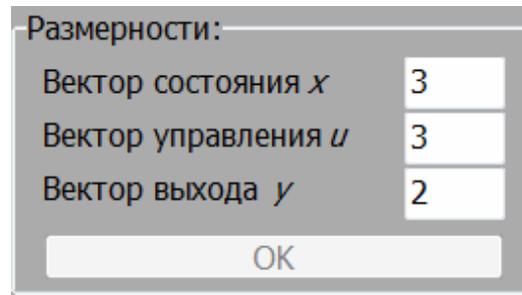


Рис. 13. Размерности векторов системы

Матрица выхода D по управлению:

	u1	u2	u3
y1	0	46	5
y2	3	0	0

Матрица управления B:

	u1	u2	u3
x1	12	0	46
x2	0	456	0
x3	8	0	0

Матрица выхода C по состоянию:

	x1	x2	x3
y1	30	0	0
y2	152	0	54

Матрица состояния системы A:

	x1	x2	x3
x1	5	0	39
x2	9	11	0
x3	0	75	0

Рис. 14. Задаем матрицы системы

После задания видим, что все матрицы заданы (рис. 15).

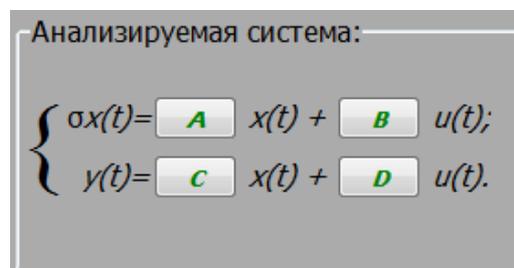


Рис. 15. Анализируемая система задана

Делаем расчет матрицы индексов каузальности системы. Результат расчета представлен на рис. 16.

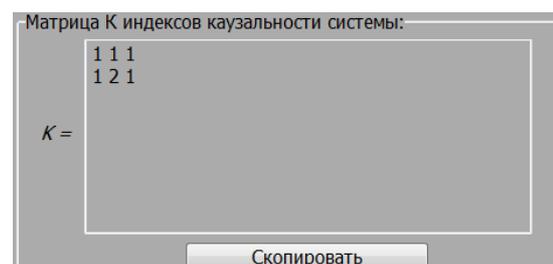


Рис. 16. Рассчитанная матрица индексов каузальности

Скопируем результат и вставим сюда: Матрица индексов каузальности K по управлению:

$$\begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \end{matrix}$$

Посмотрим промежуточные результаты (рис. 17, 18)

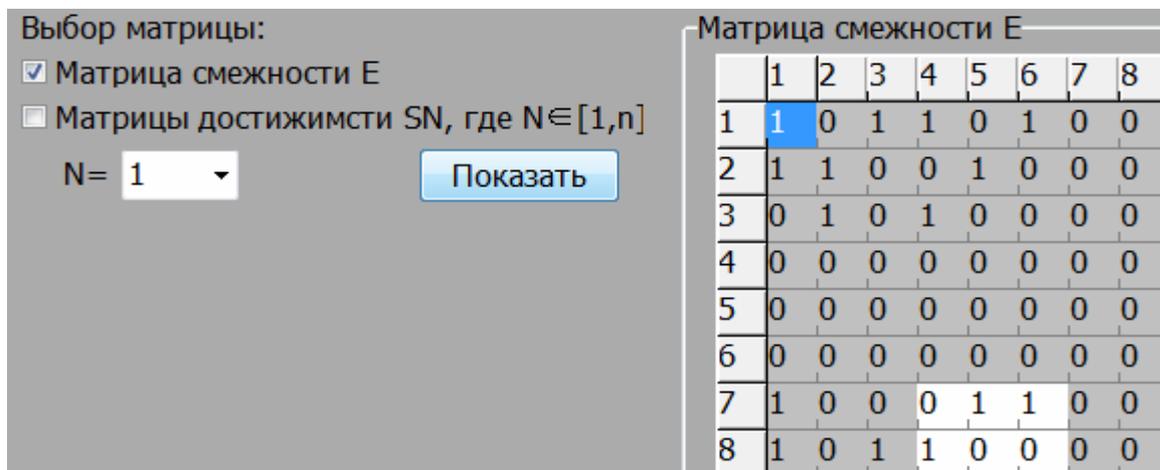


Рис. 17. Просмотр матрицы смежности системы

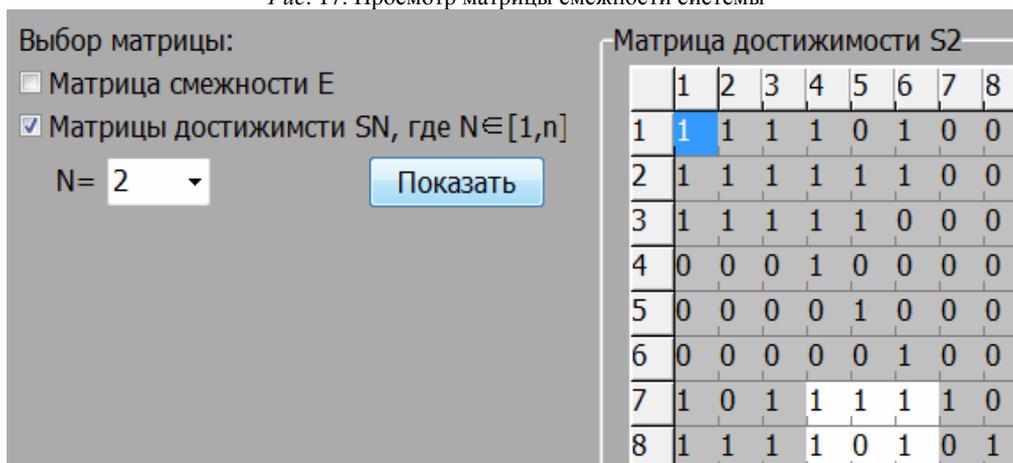


Рис. 18. Просмотр матрицы достижимости для  $N = 2$

### АЛГОРИТМ

Программный продукт работает по следующему алгоритму:

Программа написана на языке Delphi, она содержит ряд процедур, описание и назначение которых будет раскрыто ниже.

1. Процедура формирования скелетных матриц:

```

procedure Skelet(m1:matrix;var
k,l:integer;var m2:matrix;
var i,j:integer;
begin
  for i:=0 to k-1 do
    for j:=0 to l-1 do
      if m1[i,j]=0 then m2[i,j]:=0
      else m2[i,j]:=1;
end;

```

Алгоритм процедуры прост. Все числа во введенной матрице заменяются на единицы, а все нули остаются нулями.

2. Умножение матриц по правилу булевой алгебры

```

procedure
  Umnozenie(m1,m2:matrix;m3:matrix)
  ;

  var i,j,k:integer; s:integer;
  begin
    for i:=0 to alpha-1 do
      for j:=0 to alpha-1 do

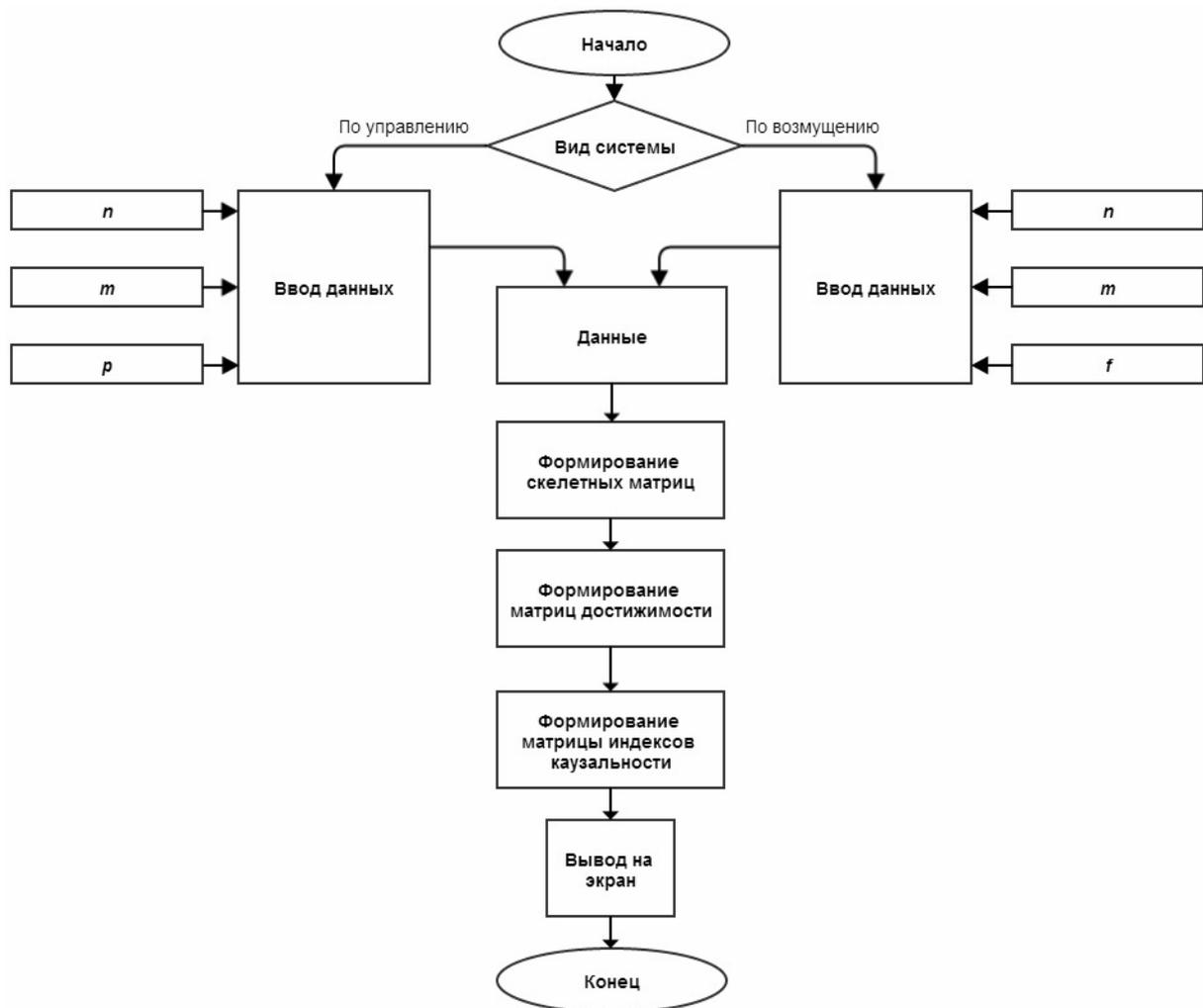
```

```

  begin
    S:=0;
    for k:=0 to alpha-1 do
      S:=S or (m1[i,k] and m2[k,j]);
      m3[i,j]:=S;
    end;
  end;

```

3. Так же в программу включен ряд процедур, которые реализованы для записи матриц в память программы, для последующего расчета и для просмотра результатов. Данные процедуры обеспечивают дружественный пользовательский интерфейс.
4. Конечная процедура производит ряд действий для расчета матриц смежности, достижимости и матрицы каузальности.
  - А. С использованием введенных матриц  $A, B, C$  и  $D$  и значений размерностей данных матриц формируются скелетные матрицы.
  - Б. Далее выполняются все необходимые операции для расчета матриц смежности.
  - В. По матрицам смежности определяется матрица каузальности и выводится на экран в соответствующее окно.



5. Программа записывает все промежуточные результаты в оперативную память и при нажатии на соответствующую кнопку, вызовется процедура, которая отвечает за демонстрацию этих результатов для того, чтобы пользователь смог оценить и проверить конечный результат.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] И. А. Криштал Спектральный анализ каузальных операторов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Воронеж, 2003. – 112 с.
- [2] D. C.Youla, H. L.Carlin, L. J. Castriota. Bounded Real Scattering Matrices and the Foundations of Linear Passive Network Theory // IRE Trans. Circuit Theory CT-6. – 1959. – P. 102–124.
- [3] A. Feintuch, R. Saeks. System Theory: A Hilbert Space Approach. – New York: Academic press, 1982. – 310 pp.
- [4] J. C. Willems. Stability, Instability, Invertibility and Causality, SIAM J. Control. – 1969. – V. 7. – № 4. – P. 645–671.
- [5] R M. DeSantis. Causality, Strict Causality and Invertibility for Systems in Hilbert Resolution Space // SIAM J. Control. – 1974. – V. 12. – № 3. – P. 536–553.
- [6] C. Commault, J. F. Lafay, M. Malabre. Structure of linear systems. Geometric and transfer matrix approaches // Kybernetika. – 1991. – V. 27. – № 3. – P. 170–185.
- [7] J. Hammer. Stabilisation of non-linear systems // Int. J. Control. – 1986. – V. 44. – № 5. – P. 1349–1381.
- [8] J. Hammer. Robust stabilisation of non-linear systems // Int. J. Control. – 1989. – V. 49. – № 2. – P. 629–653.
- [9] J.-T. Chan, L.-F. Wei. Adaptive multi-channel signal tracking controller for minimum or nonminimum phase systems // Int. J. Control. – 1989. – V. 50. – № 1. – P. 65–73.
- [10] S. K.Rao, C.-T. Chen. Design of minimal-degree compensators with assignable poles or structure // Automatica. – 1987. – V. 23. – № 2. – P. 241–245.
- [11] H.G. Lee, A. Aropostathis, S. I. Mareus. Linearisation of discrete-time systems // Int. J. Control. – 1987. – V. 45. – № 5. – P. 1803–1822.
- [12] G. Roppenecker, B. Lohmann. Vollständige Modale Synthese von Entkopplungsregelungen // Automatisierungstechnik. – 1988. – V. 36. – № 11. – S. 434–441.
- [13] А. М. Малышенко Определение индексов каузальности управляемых динамических систем // Изв. АН СССР, Техническая кибернетика. – 1990. – № 1. – С. 32–36.
- [14] А. М. Малышенко. Системы автоматического управления с избыточной размерностью вектора управления. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2005. – 302 с.
- [15] А. М. Малышенко. Индексы каузальности динамических систем и их использование в схемотехническом проектировании и при оценке функциональной воспроизводимости систем автоматического управления // Известия

Томского политехнического университета, 2013, т. 323, № 5, с. 37–44.

- [16] А. М. Малышенко, Е. А. Рыбаков, Е. А. Кочеткова. Программное обеспечение для расчета индексов каузальности линейных вход-выходных динамических систем. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013619662 от 11.10.2013 г.



**Малышенко Александр Максимович** – д. т. наук, профессор кафедры интегрированных компьютерных систем управления Национального исследовательского Томского политехнического университета. Автор более 250 научных работ, в том числе 11 монографий. Область научных интересов – теория автоматического управления, мехатроника и робототехника, управление подвижными объектами, моделирование и реинжиниринг бизнес-процессов.  
E-mail: [mam@tpu.ru](mailto:mam@tpu.ru)



**Рыбаков Евгений Александрович** – студент кафедры интегрированных компьютерных систем управления Национального исследовательского Томского политехнического университета. Автор 15 научных статей и одного патента. Область научных интересов – теория автоматического управления, электроника, измерительная техника, автоматизация.  
E-mail: [evgrybakov@gmail.com](mailto:evgrybakov@gmail.com)



**Кочеткова Евгения Андреевна** – студентка кафедры интегрированных компьютерных систем управления Национального исследовательского Томского политехнического университета. Автор 5 научных статей. Область научных интересов – теория автоматического управления, измерительная техника, электроника, оптимизация.  
E-mail: [Kjanni22@gmail.com](mailto:Kjanni22@gmail.com)

## Software for Determining the Indexes of Causality for Linear Input-Output Dynamic Systems

A. M. MALYSHENKO, E. A. RYBAKOV, T. A. KOCHETKOVA

*Abstract:* Essence of causality of input-output systems has been determined; its quality metering has been shown with the use of causality indexes. Information about the calculation of these indexes of the system with the help of its matrices of the contiguity and attainability is given. Also software is used which has been developed by the authors for the case of linear dynamic systems in which the processes are described by mathematic models with continuous and discrete time.

*Key words:* linear input-output dynamic system, automatic control system, plant, causality, indexes of causality, definition, calculation, software.

**III. Инновационные технологии.  
Перспективные технологии.  
Моделирование систем.  
Численная оптимизация.**

## Содержание раздела:

- С.Н. Грудинин, В.Д. Фроловский. Предметная параметризация виртуальных манекенов (НГТУ, Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 53–56.
- В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упредителя Смита. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 57–67. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- А.М. Расулов, А.А. Джурахалов, И.Д. Ядгаров, В.Г. Стельмах, Д.К. Ахмадалиев. Процессы формирования наноструктур при осаждении кластеров на поверхность кристаллов с помощью компьютерного моделирования. (АГУ, Андижан, Узбекистан; *Univ. of Antwerp, Antwerp, Belgium*; ИИП и ЛТ АН РУз, Ташкент, Узбекистан). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 68–75.
- В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Эффективность полноты ПИД-регулятора при управлении многоканальным объектом (НГТУ, Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 76–79.

# Предметная параметризация виртуальных манекенов

С.Н. Грудинин, В.Д. Фроловский  
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Статья посвящена анализу антропометрических характеристик человеческого тела с целью определения границ изменения параметров и их взаимосвязи в рамках задачи параметрического моделирования компьютерных манекенов.

**Ключевые слова:** параметризация, манекен, типовые фигуры, размерные признаки, выпуклая оболочка

## ВВЕДЕНИЕ

Параметризация в компьютерном моделировании сложных объектов, таких как виртуальный манекен, играет ключевую роль. Параметрическое моделирование в отличие от альтернативных способов виртуализации, например, 3D-скульптинга или 3D-сканирования, является мене дорогостоящей и позволяет интерактивно создавать новые модели, изменяя заданные параметры. Формально такой подход можно описать следующим образом: создание новой модели  $\Omega$  за счет деформации некоторой среднестатистической базовой модели  $\Psi$  согласно набору заданных параметров  $\rho$ ; таким образом, новая модель  $\Omega$ , после деформации, будет удовлетворять набору параметров  $\rho$  [1]. Параметризация сложных объектов включает в себя как минимум три абстрактных уровня:

1) *предметный* – содержащий параметры предметной области, в рамках которой моделируется объект; параметры этого уровня должны быть понятны конечному пользователю системы моделирования;

2) *семантический* – отвечающий за соблюдение ограничений налагаемых предметными параметрами на геометрическом уровне;

3) *геометрический* – описывающий параметры геометрического представления модели, например, такого как поверхности Безье, B-сплайны, NURBS и т.п.

В работе рассматривается предметный уровень – множество метрических характеристик предметной области. Представленные алгоритмы могут быть использованы для подготовки предметных параметров, поступающих на вход системы автоматизированного моделирования виртуальных манекенов, а также для обучения этой системы путем выявления

закономерностей между предметными параметрами и геометрическими параметрами деформируемых моделей. Установление такой закономерности позволяет проводить деформацию моделей в системах моделирования по понятному конечному пользователю набору предметных параметров.

Первым шагом в предметной параметризации является определение предметной области, то есть точки зрения на объект моделирования. Затем проводится анализ статистически данных с целью установления зависимости параметров и границ их изменения. На основе проведенного анализа определяется правило для проверки набора параметров на адекватность. В завершении рассматривается задача генерации множества адекватных наборов предметных параметров, она полезна при исследовании области изменения параметров и семантики объекта.

## 1. АНАЛИЗ АНТРОПОМЕТРИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Параметризация человеческого тела обычно строится на антропометрических или медицинских знаниях: антропометрических точках [1], параметрах швейного производства [2], точках акупунктуры [3], типах искривления позвоночника [4] и т.д. В данной работе, анализу подвергаются государственные, отраслевые и межгосударственные стандарты швейной промышленности [5, 6, 7, 8, 9]. Основной целью анализа является составление наиболее полного списка параметров, характеризующих правильный торс человека с точки зрения антропометрии и подкрепленных статистическими данными.

В антропометрии, при разработке стандартов (построении размерной типологии), ключевой задачей является выбор антропометрических признаков (АП), которые наилучшим образом будут определять форму и пропорции тела человека. Для получения точных и сравнимых данных измерение признаков производится между определенными точками на теле человека, так называемых антропометрических точках (АТ). Результатом разработки стандарта является множество типовых фигур, каждая из которых описывается совокупность АП, наилучшим образом характеризующее форму тела рассматриваемой группы населения [10]. В связи с тем, что исследуемые стандарты имеют

различие как по структуре, так и по составу данных, определение множества АП и АТ осуществляется с помощью комбинации данных из различных стандартов, согласно следующей последовательности действий:

- 1) за основу берется стандарт с наиболее современными статистическими данными;
- 2) в исходном стандарте выделяется множество АП  $\alpha$ , характеризующих торс;
- 3) в исходном стандарте выделяется множество АТ  $\beta$ , необходимых для определения  $\alpha$ ;
- 4) устанавливается множество АП  $\lambda$  из других стандартов, определение которых возможно по  $\beta$  без использования дополнительных точек.

Результатом этих действий является список АП, представляющий собой совокупность множеств  $\alpha$  и  $\lambda$ , необходимый для их определения список АТ – множество  $\beta$ , а также статистические данные, представляющие собой матрицу  $I = [p_1, \dots, p_N]_{M \times N}$ , где  $N$  – количество признаков, характеризующих торс,  $M$  – количество типовых фигур, описанных параметрами. Матрица  $I$ , в дальнейшем, выступает в роли обучающего набора для исследования границ изменения признаков и их взаимосвязи.

## 2. ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ

Значительная корреляционная связь между АП, дает возможность представить многие признаки при помощи одного, такие признаки называются ведущими, а выражаемые с их помощью – подчиненными [10]. Выражение подчиненных признаков через ведущие значительно снижает количество параметров, участвующих в моделировании, что облегчает процесс генерации новых моделей. Данные матрицы  $I$  используется в качестве обучающего набора для выявления зависимости между ведущими и подчиненными признаками. В качестве регрессионной модели этой зависимости используется следующее уравнение множественной регрессии [10]:

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3,$$

где  $y$  – величина подчиненного признака,  $x_1, x_2, x_3$  – величины ведущих признаков,  $a, b, c, d$  – коэффициенты регрессионной модели. Расчет  $a, b, c, d$  выполняется методом наименьших квадратов, оценка качества регрессионной модели проводится с помощью коэффициента детерминации:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^M (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^M (y_i - \bar{y})^2}, \quad \bar{y} = \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M y_i,$$

где  $y_i, \hat{y}_i$  – фактические и расчетные величины подчиненного признака. Снижение количества

признаков, приводит к уменьшению числа столбцов матрицы до трех  $I' = [p_1, p_2, p_3]_{M \times 3}$ .

## 3. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ НАБОРА ПАРАМЕТРОВ

Границы изменения параметров, легко определимы по набору  $I'$ , однако, задание параметров в этих граница не гарантирует адекватность формы модели, так как форму определяет только совокупность параметров. В связи с этим, необходимо определить критерий адекватности для совокупности параметров моделирования. Если рассмотреть матрицу  $I'$  как систему векторов  $V = [\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_M]_{M \times 3}$  в пространстве  $R^3$ , то адекватность некоторой совокупности параметров, представленной вектором  $\bar{x}$ , определяется условием: если конец вектора  $\bar{x}$  находится внутри или на границе выпуклой оболочки  $H$ , построенной вокруг множества концов векторов  $\{\bar{v}_1, \dots, \bar{v}_M\}$ , то совокупность адекватна обучающему набору [11]. Однако, как уже говорилось ранее, параметры, описывающие форму человеческого тела, зависимы друг от друга, поэтому требуется спроецировать векторы  $V$  на ортогональный базис, для этого выполняется ряд операций.

Определяется базис  $B = [\bar{b}_1, \bar{b}_2, \bar{b}_3]_{3 \times 3}$  системы векторов  $V$  путем приведения соответствующей матрицы к ступенчатому виду. Затем, базис  $B$  ортогонализируется с использованием модифицированного процесса Грама-Шмидта [12], результатом является базис  $A = [\bar{a}_1, \bar{a}_2, \bar{a}_3]_{3 \times 3}$ , при этом:

$$\begin{aligned} \bar{a}_j^{(1)} &= \bar{a}_j - P_{b_1} a_j, \\ \bar{a}_j^{(2)} &= \bar{a}_j^{(1)} - P_{b_2} a_j^{(1)}, \\ &\dots \\ \bar{a}_j^{(j-2)} &= \bar{a}_j^{(j-3)} - P_{b_{j-2}} a_j^{(j-3)}, \\ \bar{b}_j &= \bar{a}_j^{(j-2)} - P_{b_{j-1}} a_j^{(j-2)}, \\ P_b a &= \frac{\langle \bar{a}, \bar{b} \rangle}{\langle \bar{b}, \bar{b} \rangle} \bar{b}, \end{aligned}$$

где  $P_b a$  – оператор проекции вектора  $\bar{a}$  на вектор  $\bar{b}$ ,  $\langle \rangle$  – скалярное произведение. После чего вектора  $V$  проецируются на базис  $A$ :  $\bar{v}'_i = \langle \bar{v}_i, \bar{a}_j \rangle / |\bar{a}_j|$ . На основе векторов  $V' = [\bar{v}'_1, \dots, \bar{v}'_M]_{M \times 3}$  строится выпуклая оболочка  $H$  (выпуклый многогранник с треугольником в качестве грани) по алгоритму быстрой оболочки [13].

Построенная выпуклая оболочка  $H$  позволяет проверить на адекватность совокупность параметров, представленную вектором  $\bar{x}$ , по следующему алгоритму:

- 1) вектор  $\bar{x}$  проецируется на ортогонализированный базис  $A$ ;

2) с помощью алгоритма полного перебора граней выполняется проверка – лежит ли конец спроецированного вектора  $\bar{x}'$  внутри  $H$ , а именно, для каждой  $i$ -ой грани рассчитывается показатель  $C_i = \bar{n}_i(\bar{x}' - \bar{f}_i)$ , где  $\bar{n}_i$  – нормаль  $i$ -ой грани,  $\bar{f}_i$  – радиус-вектор любой точки  $i$ -ой грани; если для всех граней  $C_i < 0$ , тогда конец вектора  $\bar{x}'$  находится внутри  $H$ , значит, совокупность параметров адекватна имеющемуся обучающему набору;

3) если конец вектора  $\bar{x}'$  не лежит внутри  $H$ , тогда определяется рекомендуемая точка (лежащая на границе выпуклой оболочки), как точка пересечения границ  $H$  и вектора  $\bar{r} = \bar{x}' - \bar{O}$ , где  $\bar{O}$  – радиус-вектор центра масс выпуклой оболочки, определяемый как

$$\bar{O} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M \bar{v}_i ;$$

4) рассчитываются координаты вектора  $\bar{r}$  в базисе  $B$  решением системы линейных уравнений:  $a_i = \sum_j r_j \frac{b_{ij}}{|b_i|}$ , где  $a_i$  –  $i$ -ая координата вектора  $\bar{r}$  в базисе  $A$ ,  $r_j$  –  $j$ -ая координата вектора  $\bar{r}$  в базисе  $B$ ,  $\bar{b}_i$  – векторы базиса  $B$ ,  $b_{ij}$  –  $j$ -ая координата  $i$ -ого вектора  $\bar{b}_i$  базиса  $B$ .

#### 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВА ПАРАМЕТРОВ

Построенная по обучающему набору оболочка  $H$  может быть использована для исследования области изменения параметров, для этого рассматривается множество сгенерированных точек внутри выпуклой оболочки или на ее границе с равномерным законом распределения. В первом случае вокруг  $H$  строится минимальный прямоугольный параллелепипед  $U$ , грани которого параллельны осям системы координат пространства  $R^3$ . Параллелепипед  $U$  разбивается на множество равных прямоугольных параллелепипедов  $\{u_i\}$ ,  $i \in D$ ,  $\bigcup_{i \in D} u_i = U$ , где  $D$  – множество индексов.

Случайным образом выбирается параллелепипед  $u'$  из  $\{u_i\}$ , затем внутри него случайная точка, как конец радиус-вектора  $\bar{b} = \bar{r}(\chi l_1, \gamma l_2, \mu l_3) + \bar{a}$ , где  $\bar{a}$  – радиус-вектор в минимальную точку  $u'$ ,  $\chi, \gamma, \mu$  – случайные величины с равномерным законом распределения, изменяющиеся в интервале  $[0,1]$ ,  $l_1, l_2, l_3$  – линейные размеры  $u'$ . Точка  $\bar{b}$  не рассматривается, если лежит не внутри  $H$ .

Выбор случайных точек на границе  $H$  начинается с расчета площадей  $s_i$  всех граней  $H$ ,  $i = \overline{1, N}$ , где  $N$  – количество граней. Далее случайным образом выбирается грань с

вероятностью пропорциональной ее площади, то есть генерацией случайных чисел с равномерным законом распределения от 0 до

$$S = \sum_{i=1}^N s_i$$

и поиском соответствующей грани в массиве кумулятивных площадей. Затем, на отобранной грани определяется случайная точка [14], как конец радиус-вектора

$$\bar{b} = (1 - \sqrt{\eta})\bar{a} + \sqrt{\eta}(1 - r_2)\bar{b} + \sqrt{\eta}r_2\bar{c}, \quad 0 \leq \eta \leq 1, \quad 0 \leq r_2 \leq 1,$$

где  $\bar{a}, \bar{b}, \bar{c}$  – радиус-векторы в вершины треугольника,  $r_1, r_2$  – случайные величины с равномерным законом распределения.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные в работе алгоритмы проверяются на основе стандартов [5-9], в качестве исходного стандарта использовался стандарт [9].

Статистические данные для матрицы  $I$  формировались по таблицам 2-ой полнотной группы исходного стандарта, дополняясь данными из других стандартов. Итоговый размер матрицы  $I$ , участвующей в исследовании,  $80 \times 50$ . Ведущими признаками выступали рост, обхват груди второй и обхват талии. При оценке регрессионной модели коэффициент детерминации принимает значение в диапазоне от 0,984 до 1, что говорит о высоком соответствии регрессионной модели статистическим данным. На рис. 1 изображена выпуклая оболочка в трехмерном пространстве, построенная по исходным данным.

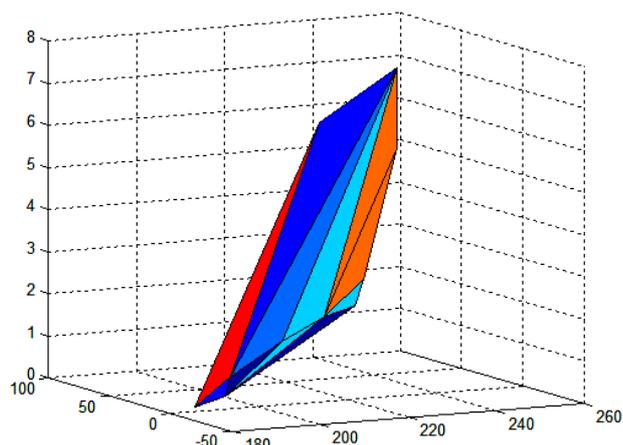


Рис. 1. Выпуклая оболочка, построенная на данных стандарта [9]

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] Фроловский В.Д. Компьютерное проектирование манекенов и одежды. Трехмерные модели и математические методы. Издательский Дом: LAP LAMBERT Academic Publishing, Saarbrucken, Germany, 2012. 269 с.

- [2] Wang C.C.L. Parameterization and parametric design of mannequins // Computer-Aided Design. 2005. Vol. 37. № 1. pp. 83–98.
- [3] Lin S.-F., Chien S.-C. Create a Virtual Mannequin Through the 2-D Image based Anthropometric Measurements and Radius Distance Free Form Deformation // International Journal of Advanced Computer Science and Applications (IJACSA). 2011. Vol. 2. № 4. pp. 60–67.
- [4] Балжирсурэн Г., Фроловский В.Д. Автоматизация проектирования нестандартных параметризованных 3D манекенов // Научный вестник НГТУ. 2009. № 1(34). С. 117–128.
- [5] ГОСТ 17522-72. Типовые фигуры женщин. Размерные признаки для проектирования одежды.
- [6] ОСТ 17-326-81. Изделия швейные, трикотажные, меховые. Типовые фигуры женщин. Размерные признаки для проектирования одежды.
- [7] ОСТ 17-474-75. Манекены для женской одежды.
- [8] ГОСТ 31396-2009. Классификация типовых фигур женщин по ростам, размерам и полнотным группам для проектирования одежды.
- [9] Типовые фигуры женщин. Размерные признаки для проектирования одежды. М: ЦНИИШП, 2003. 93 с.
- [10] Коблякова Е.Б., Дунаевская Т.Н., Ивлева Г.С., Ивлева Р.В. Размерная типология населения с основами анатомии и морфологии. М: Мастерство; Издательский центр «Академия», 2001. 288 с.
- [11] Chu C.-H., Tsai Y.-T., Wang C.C.L., Kwok T.-H. Exemplar-Based Statistical Model for Semantic Parametric Design of Human Body // Computers in Industry. 2010. Vol. 61. № 6. pp. 541–549.
- [12] Канатников А.Н., Крищенко А.П. Линейная алгебра : учеб. для вузов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 336 с.
- [13] Barber C.B., Dobkin D.P., Huhdanpaa H.T. The Quickhull algorithm for convex hulls // ACM Transactions on Mathematical Software. 1996. Vol. 22. № 4. pp. 469–483.
- [14] Osada R., Funkhouser T., Chazelle B., Dobkin D. Shape Distributions // ACM Transactions on Graphics. 2002. Vol. 21. № 4. pp. 807–832.



**Сергей Николаевич Грудинин** – аспирант кафедры Автоматизированных систем управления в НГТУ. Область научных интересов – моделирование и автоматизация процессов геометрического проектирования.

E-mail: [sn\\_grudinin@mail.ru](mailto:sn_grudinin@mail.ru)



**Владимир Дмитриевич Фроловский** – профессор кафедры Автоматизированных систем управления в НГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов – моделирование и автоматизация процессов геометрического проектирования.

E-mail: [vdf-nstu@yandex.ru](mailto:vdf-nstu@yandex.ru)

### Subject Parameterization of Virtual Mannequins

S.N. GRUDININ, V.D. FROLOVSKY

*Abstract:* The article deals with analysis of the human body anthropometric characteristics for the purpose of determining boundaries of the parameters changing and their interconnections within a problem of parametric modeling of computer mannequins.

*Key words:* Parameterization, Mannequin, standard figures, Dimensional features, convex hull.

# Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упредителя Смита

Вадим Жмудь, Олег Ядрышников

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Задача управления многоканальными объектами, в которых присутствуют перекрестные связи от многих (всех) входов к многим (всем) выходам представляет существенный интерес в связи с тем, что такие задачи встречаются во множестве реальных ситуаций. При этом аналитические методы разработаны лишь для линейных систем без запаздывания. Применение моделирования и численной оптимизации позволяет решать эту задачу более эффективно. Однако и в этом случае переходные процессы в системе зачастую обладают недостаточным качеством вследствие большого перерегулирования. Развитие идеи упредителя Смита и обводного канала для многоканального случая с последующим применением численной оптимизации, а также соответствующая модификация стоимостной (целевой) функции, применяемой для оптимизации, позволяет предложить новую методику управления многоканальными объектами, содержащими существенное запаздывание. Методика апробирована на примере.

**Ключевые слова:** автоматика, регуляторы, многоканальные системы, численная оптимизация, моделирование

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Управление объектами в контуре с отрицательной обратной связью применяется везде, где требуется высокая точность и (или) независимость результата управления от внешних или внутренних неизмеряемых возмущений. Особый класс объектов представляют многоканальные объекты, в которых имеется несколько входных и нескольких выходных величин, причем имеет место влияние каждой входной величины на каждую выходную величину, что называется перекрестным влиянием (или перекрестными связями). Требуется проектирование регулятора, обеспечивающего автономное управление каждой выходной величиной с помощью заранее выбранных входных величин.

Например, требуется управлять температурой и объемом продукта в реакторе с помощью скоростей подачи двух реактивов.

Если объект линеен, как правило, его математическую модель в таком случае можно задать матричной передаточной функцией в операторной области, то есть в виде отношений преобразований Лапласа от выходных сигналов к порождающим их входным сигналам.

Простейший подход к решению этой задачи состоит в выборе соответствия между входными воздействиями и выходными величинами на основе принципа наиболее сильного влияния, если это возможно. Например, если в полупроводниковом лазере требуется стабилизировать частоту и мощность излучения, с учетом, что на каждый из таких параметров влияют температура этого лазера и ток накачки, то возможно два варианта организации управления: а) изменения мощности пытаться регулировать изменениями тока накачки, а изменения частоты излучения пытаться регулировать изменением температуры лазера; б) мощность регулировать за счет изменения температуры, а частоту – за счет изменения тока накачки. Во втором случае поставленную задачу будет решать значительно сложнее, поскольку ток гораздо сильнее влияет на мощность излучения, чем температура. Данное утверждение далеко не очевидно, поэтому требует разъяснения: как можно сравнивать четыре величины с различным наименованием. Действительно, приращение мощности от тока измеряется в Ваттах на Ампер, приращение мощности от температуры – в Ваттах на градус, приращение частоты от тока – в Герцах на Ампер, а приращение частоты от температуры – в Герцах на градус.

Представим матрицу статических коэффициентов в следующем виде:

$$\begin{matrix} K_{11} (W/A) & K_{12} (W/grade) \\ K_{21} (Hz/A) & K_{22} (Hz/grade) \end{matrix}$$

Умножим левый столбец на 1 А, а правый – на 1 градус. После этого разделим верхнюю строку на 1 Вт, а нижнюю – на 1 Гц. Получим безразмерные величины. Среди этих величин найдем наибольшую величину. Если она не находится на главной диагонали, изменим нумерацию второго индекса, а именно: 1 заменим на 2, а 2 – на 1, то есть поменяем местами столбцы. В итоге, как минимум, самая

большая величина будет находиться в главной диагонали. Это означает, что, по меньшей мере, одно из двух входных воздействий вызовет в прямом канале отклик более существенный, чем в побочном канале. Если при этом второй элемент в главной диагонали будет больше, чем другие два элемента, задача синтеза многоканального регулятора будет более простой, чем в случае, если бы это условие не было выполнено.

При выполнении этого условия можно предпринять попытку обеспечения управления каждой величиной в скалярном (одноканальном) контуре управления. Например, можно сделать две скалярные обратные связи с ПИД-регулятором в прямом тракте. В этом случае матричный регулятор может быть представлен диагональной матрицей, в которой ненулевые члены расположены лишь в главной диагонали. Такой подход может быть эффективным, если в модели объекта наиболее сильное влияние имеет место между выбранными управляющими сигналами и увязанными с ними выходными величинами. То есть во всем диапазоне рабочих частот матричная передаточная функция характеризуется тем, что в главной диагонали стоят члены, величина которых существенно выше, чем величина членов в неглавной диагонали.

Может оказаться, что указанный подход не эффективен, поскольку перекрестное влияние каналов не столь незначительное, чтобы им можно было пренебречь при синтезе регулятора, то есть, чтобы оно достаточно эффективно подавлялось действием основных (диагональных) контуров управления. В этом случае необходимо применение метода проектирования матричного регулятора.

В случае, когда объект линеен, можно использовать один из существующих аналитических методов синтеза регулятора для управления таким объектом. Например, если элементы передаточной функции регулятора – апериодические звенья, то в качестве регулятора можно предложить матрицу, являющуюся обращением матрицы регулятора, домноженную на коэффициент и интегратор, то есть множитель  $K/s$ . В этом случае результатом умножения матрицы регулятора на матрицу объекта будет диагональная матрица с интеграторами в главной диагонали. Такая система будет успешно решать задачу автономного управления выходными величинами. Если элементы объекта имеют более высокий порядок, можно попытаться аппроксимировать их элементами первого порядка и применить этот метод, но результат может не быть столь успешным. Существуют и другие методы аналитического расчета многоканальных регуляторов. Однако, если в объекте содержатся элементы запаздывания и (или) нелинейные звенья, то аналитических

методов для расчета регуляторов не существует.

Численные методы состоят в моделировании системы, состоящей из объекта и регулятора, в анализе результатов моделирования при различных численных параметрах регулятора и выборе таких параметров, при которых задача решается наиболее успешно. Численные методы можно разделить на методы эмпирического подбора, методы оптимизации и прочие.

Эмпирический подбор реализует некоторые простейшие правила или алгоритмы отыскания таких параметров регулятора, которые обеспечивают удовлетворительное решение задачи, даже если этот результат и не является оптимальным.

Методы оптимизации требуют формулировки критерия качества системы в численном виде, например, в виде стоимостной функции. Далее используются процедуры для отыскания таких параметров регулятора, которые обеспечивают наименьшее значение этой стоимостной функции.

К прочим методам можно, например, отнести метод Монте-Карло, который состоит в серии экспериментов со случайным заданием параметров регулятора с выбором того результата, который в наибольшей степени отвечает цели управления.

Также к прочим методам можно отнести все иные методы, основанные на опыте или интуиции разработчика, или на здравом смысле.

Например, можно рассмотреть задачу управления уровнем воды в бассейне и температурой воды при условии втекания в него холодной и горячей воды и неуправляемой скорости вытекания воды и неуправляемом охлаждении. При этом очевидно, что вклад увеличения скорости втекания горячей и холодной воды будет соизмеримо сказываться как на изменении температуры, так и на изменении уровня воды. Возникает конкуренция между двумя контурами управления. Однако здравый смысл подсказывает, что для управления температурой можно вместо выбора одного из двух воздействий – приращение скорости потока горячей воды или приращения скорости потока холодной воды – выбрать приращение суммы этих скоростей, а для управления температурой выбрать приращение разности этих скоростей. Такой скорректированный объект будет управляться более эффективно.

Действительно, пусть, например, все передаточные функции соизмеримы. Тогда приращение уровня  $Y_1$  определяется соотношением  $Y_1 = W_{11}U_1 + W_{12}U_2$ , приращением температуры  $Y_2$  определяется соотношением  $Y_2 = W_{21}U_1 - W_{22}U_2$ . Обозначим выходные сигналы регулятора, соответственно,  $R_1$  и  $R_2$ . Зададим следующее соотношение:  $U_1 = R_1 + R_2$ ,  $U_2 = R_1 - R_2$ . Отсюда получаем:

$$Y_1 = W_{11}(R_1 + R_2) + W_{12}(R_1 - R_2),$$

$$Y_2 = W_{21}(R_1 + R_2) - W_{22}(R_1 - R_2),$$

или

$$Y_1 = (W_{11} + W_{12}) R_1 + (W_{11} - W_{12}) R_2,$$

$$Y_2 = (W_{21} - W_{22}) R_1 + (W_{21} + W_{22}) R_2.$$

Например, в случае равенства всех передаточных функций получаем полное диагональное развязывание:

$$Y_1 = 2W R_1, Y_2 = 2W R_2.$$

Рассмотренный пример легко понимается на интуитивном уровне, но примененный алгоритм действий трудно формализовать, поэтому в дальнейшем мы будем полагать, что все возможные процедуры упрощения задачи управления уже применены, но задача все же не упрощается настолько, чтобы можно было пренебречь непрямым влиянием контуров, то есть она остается многоканальной задачей синтеза регулятора.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

Пусть объект описывается матричной передаточной функцией размерности  $N \times N$ , элементами которой являются последовательно соединенные апериодические звенья и звенья чистого запаздывания.

Требуется разработка процедуры для оптимизации регулятора, которая позволила бы рассчитать регулятор в виде функциональной матрицы, также размерности  $N \times N$ , элементами которой были бы физически реализуемые звенья в виде рациональных дробей, например, ПИД-регуляторы.

Предлагаемая процедура содержит следующие шаги.

1. Если возможны какие-либо методы упрощения, аналогичные тем, которые рассмотрены во введении, их целесообразно применить на предварительном этапе путем добавления на входе объекта соответствующей матрицы. Далее полученный модифицированный объект считаем новым объектом и применяем к нему все последующие процедуры.
2. Элементами главной диагонали матрицы регулятора выбираем ПИД-регуляторы вида:  $W_{ii}(s) = K_{Pii} + K_{Dii}s + K_{Iii}/s$ . Здесь  $K_{Pii}$ ,  $K_{Dii}$  и  $K_{Iii}$  – коэффициенты пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего трактов,  $s$  – аргумент преобразования Лапласа.
3. Остальными элементами матрицы регулятора выбираем ПД-регуляторы вида:  $W_{ij}(s) = K_{Pij} + K_{Dij}s$ . Если переходный процесс не удовлетворителен, в диагональные элементы также следует ввести интегрирующие слагаемые  $K_{Iij}/s$ .
4. Задаем длительность моделирования равной  $NT$ , где  $T$  – предполагаемая длительность окончания переходного процесса в системе (эта величина в ходе моделирования может быть уточнена).

5. На первый вход при моделировании формируем входное воздействие  $V_1$  в виде ступенчатой единичной функции без запаздывания. На второй вход формируем аналогичное воздействие  $V_2$  с запаздыванием, равным  $T$ , и так далее, для  $i$ -го входа запаздывание равно  $T(i-1)$ .
6. Формируем весовую функцию  $F$  в виде последовательности пилообразных сигналов, линейно нарастающих от нуля до произвольно заданной константы с периодом, равным  $T$ .
7. С помощью  $N$  вычитающих устройств формируем столбец ошибок управления  $E_i$ , равных разности между предписанными сигналами  $V_i$  и выходными величинами  $Y_i$ . То есть  $E_i = V_i - Y_i$ .
8. Полученные ошибки  $E_i$  используем как входные сигналы для матричной передаточной функции многоканального регулятора, а также для вычисления стоимостной функции. При этом стоимостная функция вычисляется путем интегрирования суммы модулей всех ошибок, умноженной на весовую функцию  $F$ .
9. Используем процедуру оптимизации регулятора, анализируем результат.
10. Если результат не удовлетворителен, применяем многоканальный упредитель Смита [5], чтобы сформировать новый «составной объект». К полученному «составному объекту» применяем всю вышеизложенную процедуру по пунктам 2–9.
11. Вместо упредителя Смита можно использовать его развитие в виде обводного канала [5]. Отличие обводного канала состоит в том, что его структура может варьироваться.

Многоканальный упредитель Смита формируем по тому же принципу, по которому предполагается формировать одноканальный упредитель Смита, распространив этот принцип на многоканальный объект.

## 3. ИДЕЯ МНОГОКАНАЛЬНОГО УПРЕДИТЕЛЯ СМИТА

В одноканальном варианте идея упредителя Смита состоит в следующем [5]. Пусть модель объекта состоит из двух частей: минимально-фазовая часть с передаточной функцией  $W_{MФ}(s)$  и элемент запаздывания с передаточной функцией  $W_3(s) = \exp(-\tau s)$ . В этом случае параллельно объекту включается упредитель Смита, передаточная функция которого равна:

$$W_{УС}(s) = W_{MФ}(s)[1 - W_3(s)]. \quad (1)$$

В данной статье исследуется возможность использования этой идеи для случая многоканального объекта. Идея используется

как основа, которая дополняется приведенной выше методикой оптимизации многоканального регулятора.

#### 4. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА МНОГОКАНАЛЬНОГО РЕГУЛЯТОРА ПРЕДЛОЖЕННЫМ ПУТЕМ

**Пример 1. Решение задачи без упредителя Смита.** Пусть минимально-фазовая часть задается матрицей с аperiodическими звеньями, то есть элементы матрицы являются фильтрами первого порядка:

$$W_{M\Phi}(s) = \begin{bmatrix} \frac{2}{s+1} & \frac{0,5}{5s+1} \\ \frac{0,5}{5s+1} & \frac{2}{s+1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

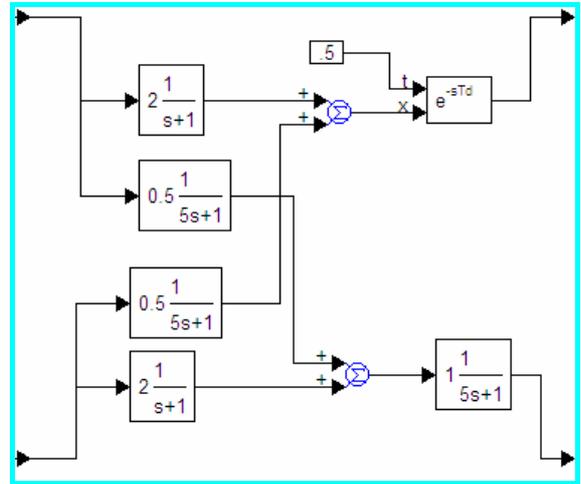
Рассмотрим пример, который не вполне соответствует подходу, предложенному в идее упредителя Смита. А именно, пусть элемент запаздывания не вполне является звеном чистого запаздывания, а вместо этого чистое запаздывание имеется лишь в одном канале, а в другом канале имеется элемент с ограниченным быстродействием в виде дополнительного фильтра. В этом случае такая передаточная функция квазизапаздывания описывается матрицей следующего вида:

$$W_3(s) = \begin{bmatrix} \exp(-0,5s) & 0 \\ 0 & \frac{1}{5s+1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

На *рис. 1* показана структурная схема такого элемента при моделировании его в программе

*VisSim*.

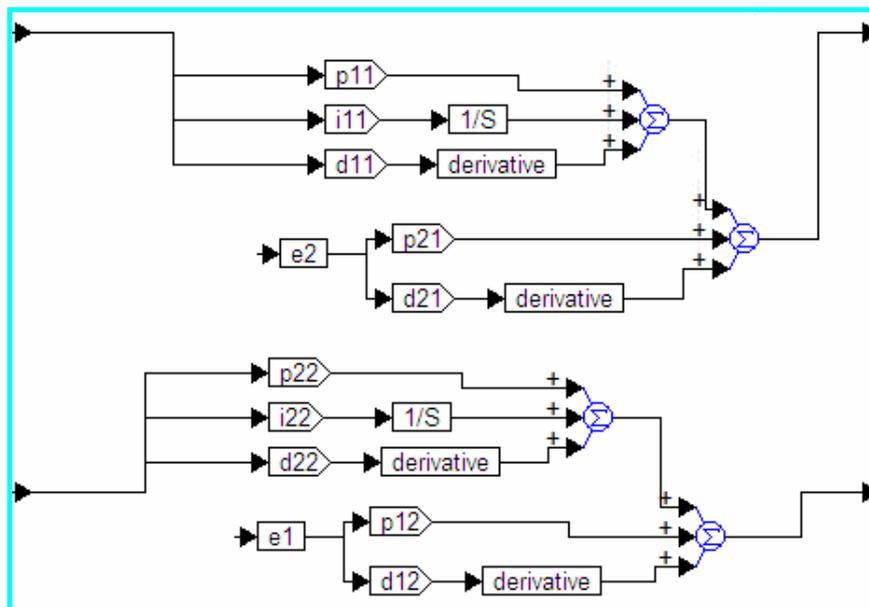
В соответствии с изложенными в разделе 2 принципами, ПИД-регулятор размерности  $2 \times 2$  имеет вид, структурная схема которого (также для программы *VisSim*) показана на *рис. 2*.



*Рис. 1.* Структура объекта

На *рис. 3* показана структура для моделирования всей системы. На этой структуре присутствуют также блоки для оптимизации коэффициентов регулятора, показаны результаты оптимизации в виде полученных коэффициентов и в виде получаемых переходных процессов. Видно, что перерегулирование по первому каналу составляет около 30 %.

В данном примере результат не столь плох, чтобы служить основанием для поиска альтернативных методов, поэтому усложним задачу.



*Рис. 2.* Структура регулятора (ПИД в главных диагоналях и ПИ в неглавных диагоналях)

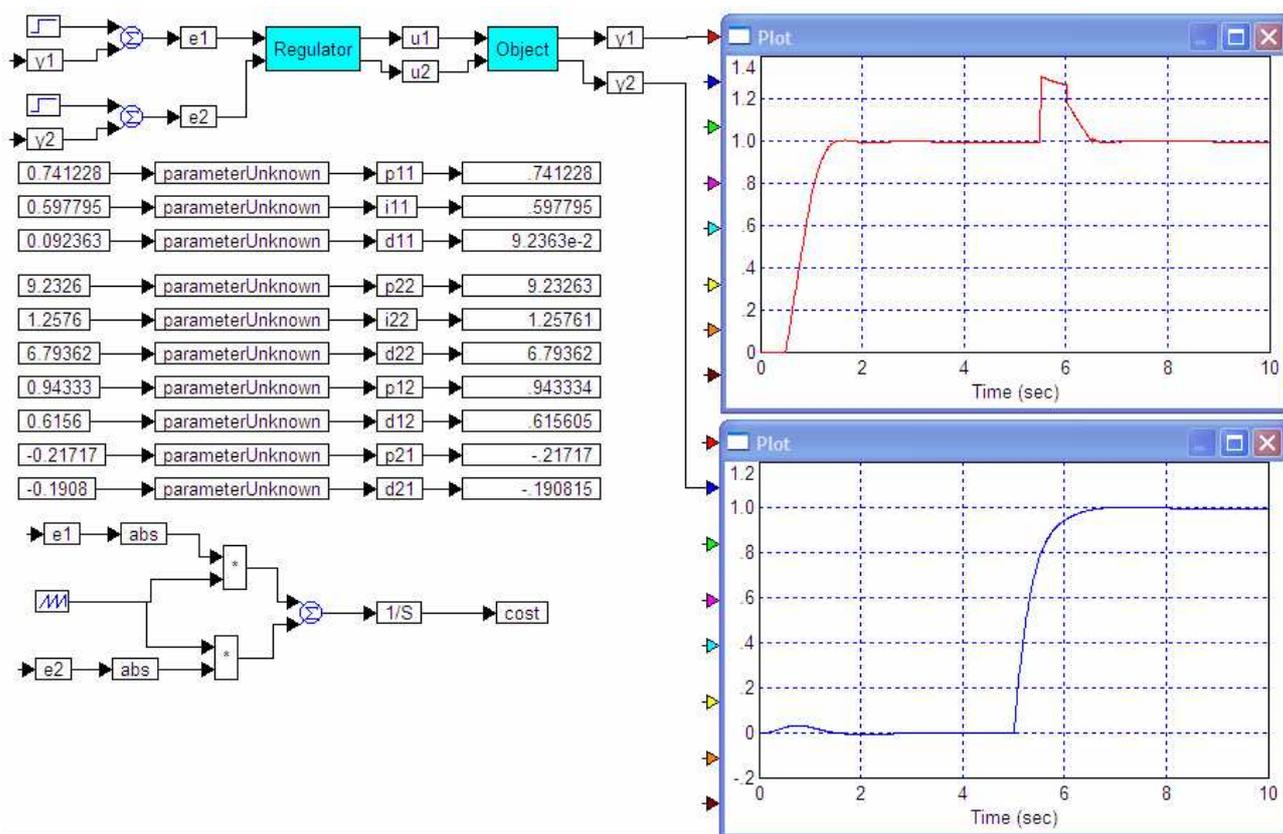


Рис. 3. Результат численной оптимизации регулятора: значения коэффициентов и получаемые переходные процессы в системе

**Пример 2.** Рассмотрим вариант объекта менее благоприятных сочетаний свойств прямого и побочного трактов. Пусть минимально-фазовая часть задается матрицей с апериодическими звеньями, то есть элементы матрицы являются фильтрами первого порядка:

$$W_{M\Phi}(s) = \begin{bmatrix} \frac{2}{s+1} & \frac{1}{2s+1} \\ \frac{1,5}{3s+1} & \frac{1}{s+1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Структура такого объекта показана на рис. 4. На рис. 5 и 6 показаны переходные процессы соответствующих передаточных функций, входящих в матричную передаточную функцию (4) (отклик на единичное ступенчатое воздействие). На рис. 7 показаны отклики объекта на единичный скачок первого и второго входов управления при их отдельной подаче на эти входы.

На рис. 8 показана схема оптимизации и результат в случае, когда первым ступенчатым воздействием является скачок на первом канале, а затем, через 20 с, на второй канал поступает отрицательный скачок из «1» в «0». Видно, что в обоих случаях на выходе первого канала имеет место слишком большое перерегуливание. После первого скачка оно составляет около

50 %, а после второго – около – 75 %.

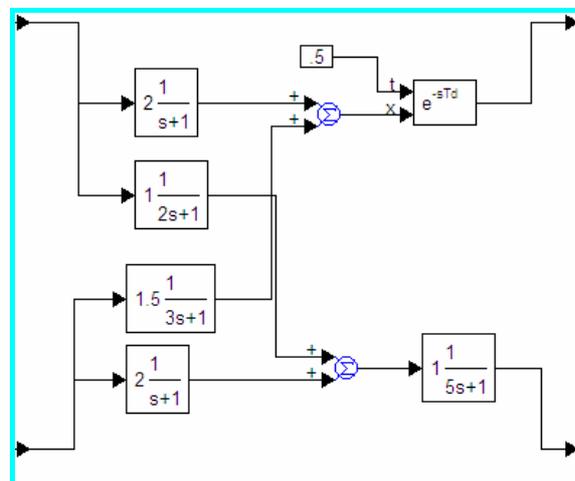


Рис. 4. Структура другого объекта: в неглавных диагоналях поднято быстродействие и коэффициенты передачи

Также переходные процессы на рис. 8 отличаются тем, что время между скачками составляет 5 с. Как видим, перерегуливание на втором канале может составить при неблагоприятном сочетании входных воздействий 125 %, что никак нельзя признать допустимым практически ни в какой практической задаче.

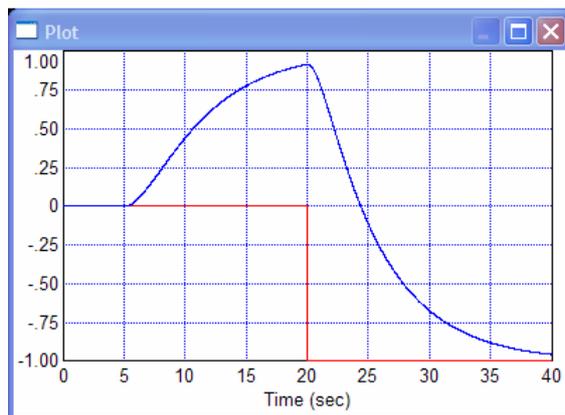
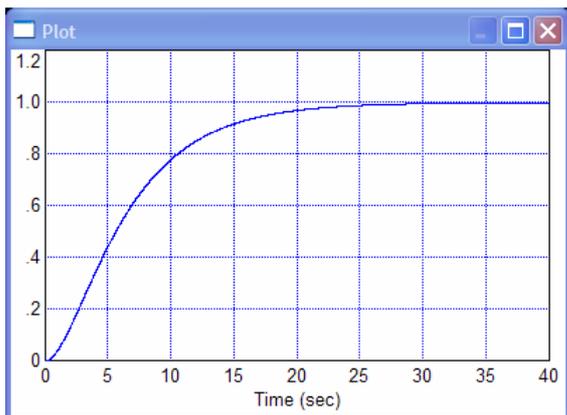
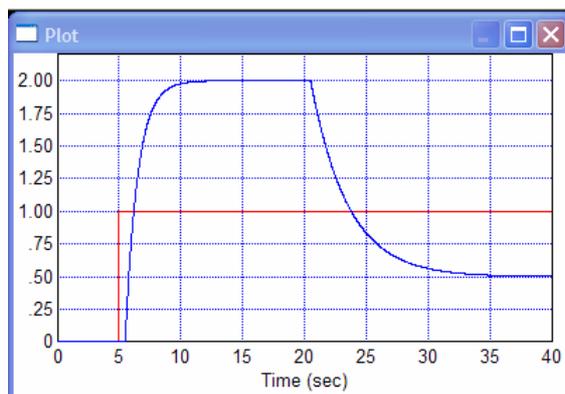
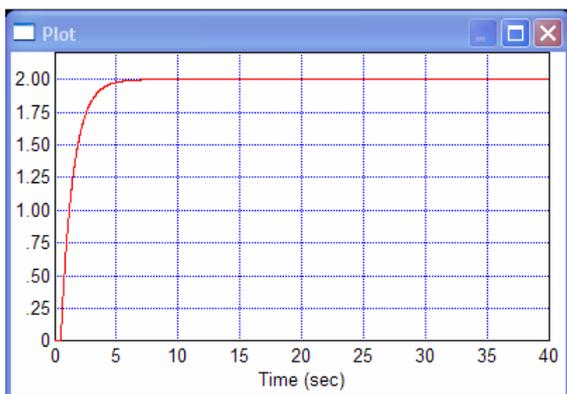


Рис. 5. Отклик передаточных функций первой строки (4) на единичный скачок

Рис. 7. Отклики объекта на единичный скачок первого и второго входов управления при их раздельной подаче на эти входы

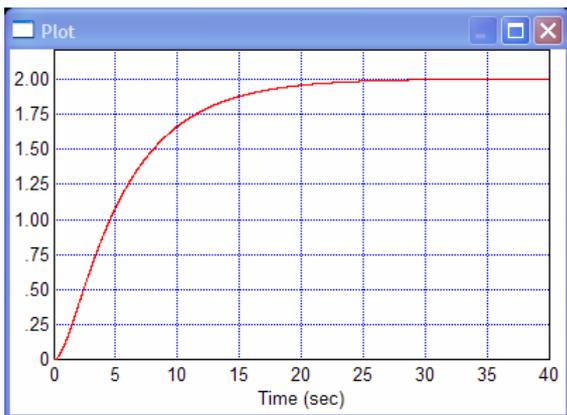
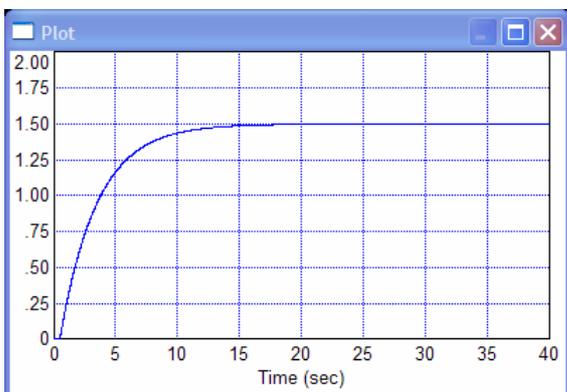


Рис. 6. Отклик передаточных функций второй строки (4) на единичный скачок

На рис. 10 показан результат оптимизации в такой же схеме для случая, когда ступенчатый положительный скачок сначала подается на второй канал, а затем, через 5 с, на первый канал. В результирующей системе в первом канале сохраняется плохое перерегулирование.

Наконец, можно попытаться увеличить время между скачками и в этом случае; результат показан на рис. 11. В полученной системе по-прежнему остается излишне большое перерегулирование в первом канале.

Можно сделать следующие предварительные выводы:

**Вывод 1:** Последовательность и знак выбранных тестовых воздействий при оптимизации многоканального регулятора влияют на результат.

**Вывод 2:** Время моделирования и время между последовательно подаваемыми тестовыми воздействиями при оптимизации многоканального регулятора влияют на результат.

**Вывод 3:** Многоканальный ПИД-регулятор для объекта, описываемого произведением передаточных функций (4) и (3), при оптимизации по критерию минимума интеграла от суммы модулей ошибок, умноженных на время с момента поступления скачка, не привело к удовлетворительному результату: перерегулирование слишком велико.

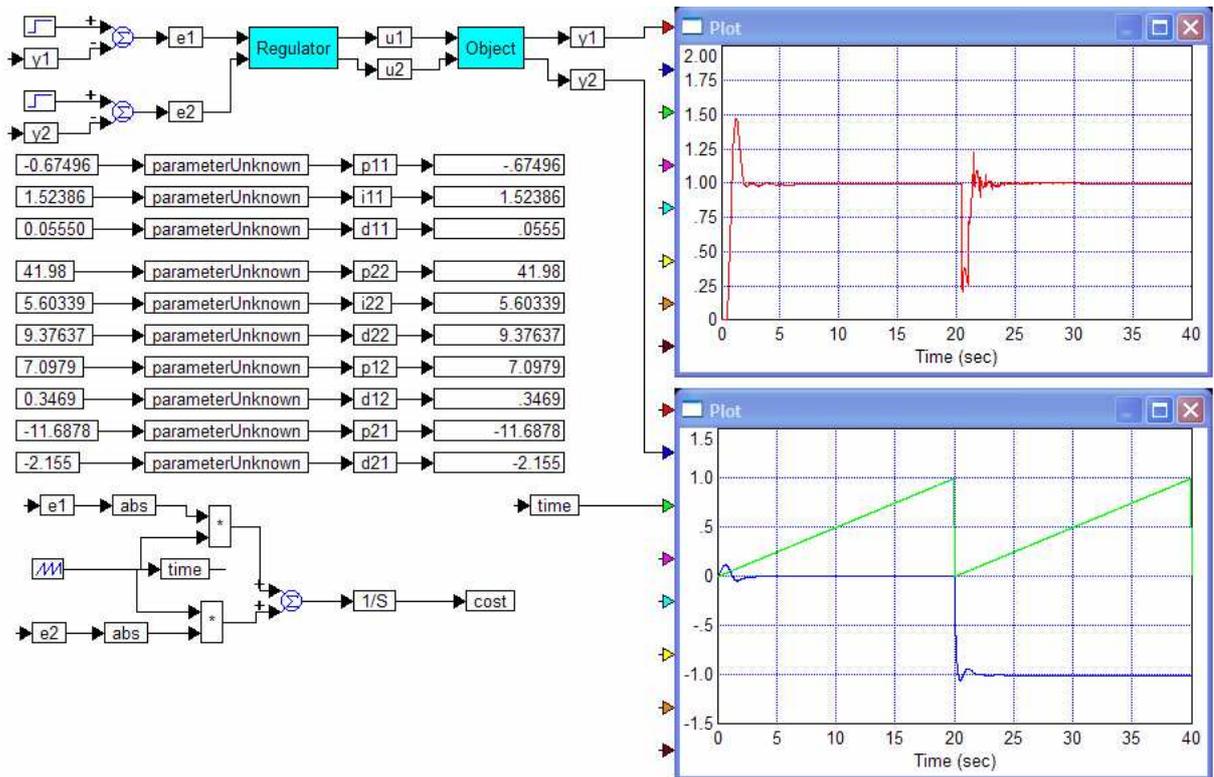


Рис. 8. Результат оптимизации ПИД-регулятора 2×2 для объекта (4), последовательность скачков: сначала на первый канал из «0» в «1», затем на второй канал из «1» в «0», между скачками 20 с

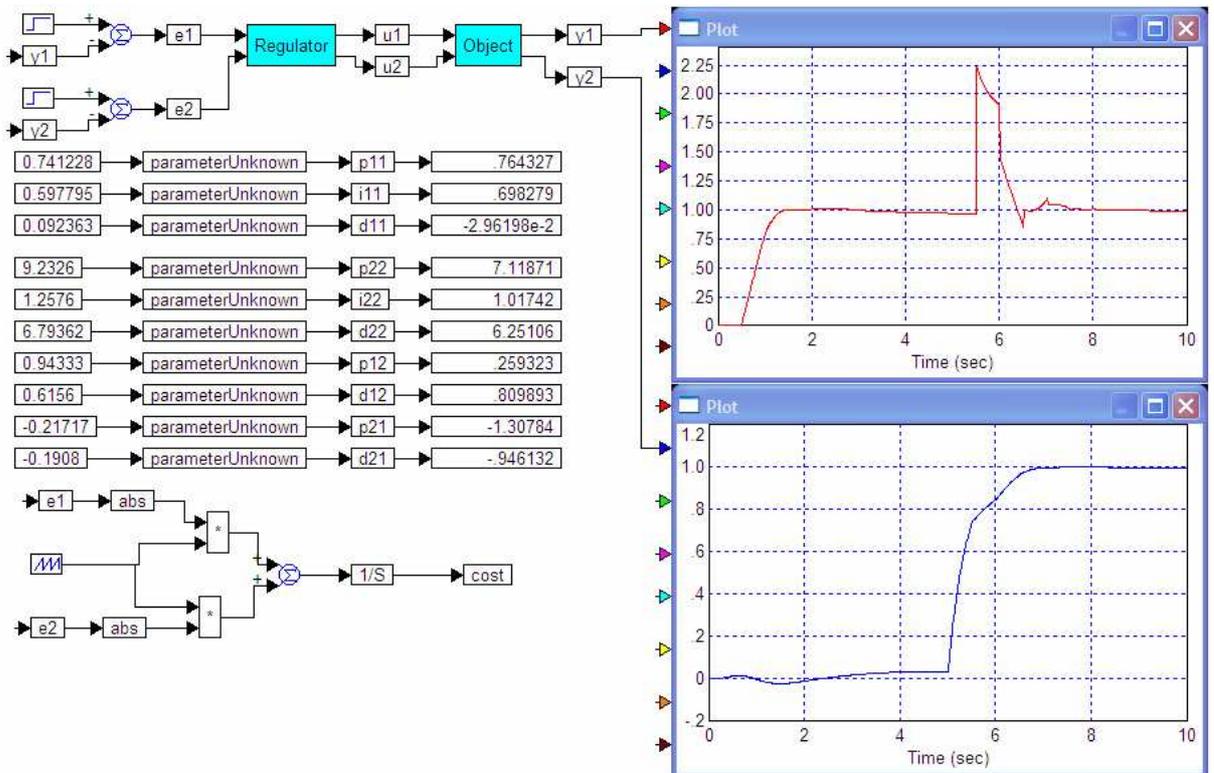


Рис. 9. Тот же результат оптимизации ПИД-регулятора 2×2 для объекта (4), последовательность скачков, та же, оба скачка из «0» в «1», время между скачками - 5 с

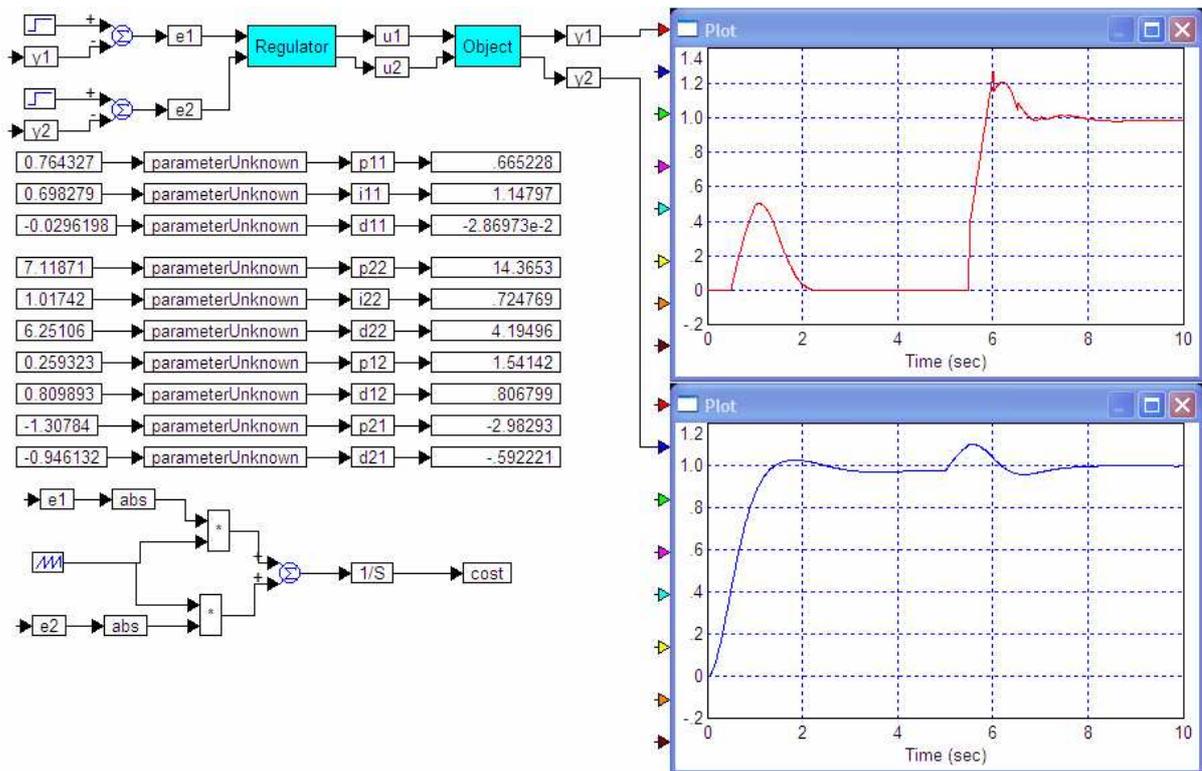


Рис. 10. Результаты оптимизации при подаче сначала единичного скачка на второй вход, а затем, через 5 с, единичного скачка на первый вход – плохое перерегулирование в первом канале

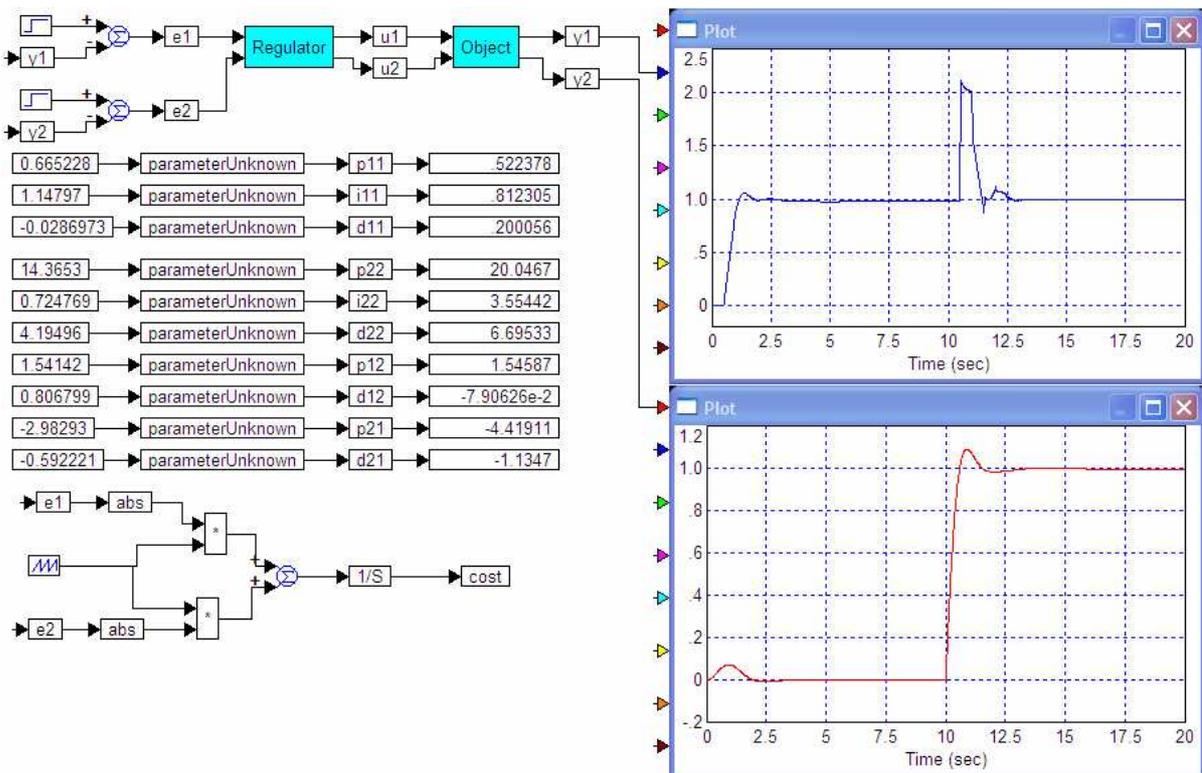


Рис. 11. Результаты оптимизации при подаче сначала единичного скачка на второй вход, а затем, через 10 с, единичного скачка на первый вход – плохое перерегулирование в первом канале

Для более эффективной оптимизации регулятора введем в стоимостную функцию «детектор правильности движения», предложенный нами в [6]. Детектор правильности движения определяет

произведение ошибки на ее производную по времени. Это произведение при качественном переходном процессе должно быть отрицательным, то есть ошибка должна убывать, если она положительна и она должна

возрастать, если она отрицательна. Иными словами, ошибка движется к нулю, если это произведение отрицательно, и она движется от нуля (возрастает по абсолютной величине), если это произведение положительно.

При использовании составной стоимостной функции важен выбор весового коэффициента, определяющего соотношения между ними. На рис. 12 показаны результаты оптимизации в случае, когда весовой коэффициент при втором члене равен пяти. В этом случае эффективно подавляется перерегулирование, однако, основная цель управления стоеи в обеспечении нулевой ошибки управления. В полученных переходных процессах плохая точность управления первого канала: видно, что ошибка

со временем возрастает. Этот результат также проявляется в том, что один из коэффициентов интегратора отрицателен (выход блока i22 равен -1,65328). Все коэффициенты интеграторов главной диагонали ( $i=j$ ) должны быть положительными. Отрицательными могут быть в идеале лишь коэффициенты побочных трактов, то есть коэффициенты, нумерация которых не совпадает, например, p21, d21 и т. д. В редких случаях можно согласиться с отрицательными коэффициентами дифференцирующих трактов в главной диагонали, но это совершенно исключено для интегратора (если коэффициенты передаточных функций объекта в главной диагонали положительны).

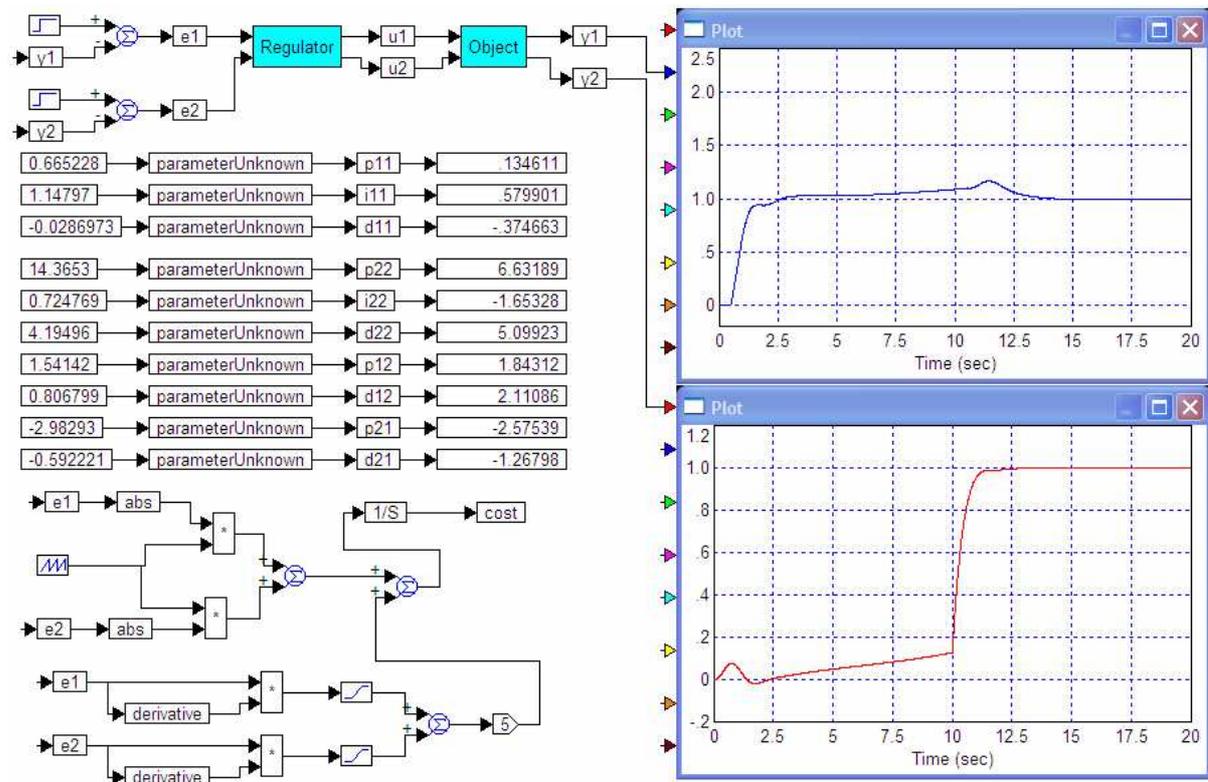


Рис. 12. Результаты оптимизации при вводе детектора правильности движений с весовым коэффициентом 5: малое перерегулирование в каждом канале, но плохая точность управления в первом канале

На рис. 13 показан наилучший полученный результат с этой структурой регулятора, а именно: достигнут астатизм каждого тракта, перерегулирование умеренно большое только по одному каналу, астатизм подтверждается положительными коэффициентами интеграторов главных диагоналей и визуально по графикам не опровергается предположение астатического управления (ошибки стремятся к

нулю)  
 На рис. 14 показан результат, полученный с упредителем Смита. Структура этого упредителя также приведена на этом рис. 14. Видно, что перерегулирование первого канала снижено до 25 %, во втором канале оно несколько меньше, около 20 %, статическая ошибка каждого канала достаточна мала

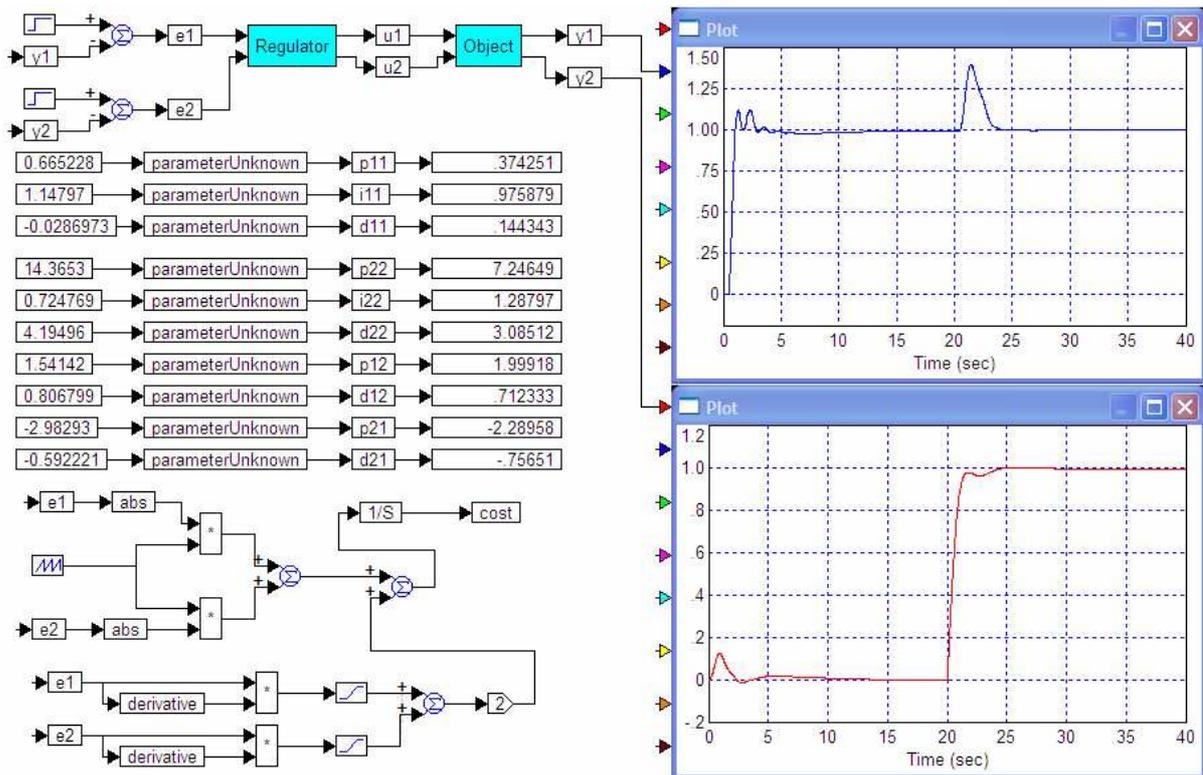


Рис. 13. Наилучший результат, полученный со структурой регулятора без упредителя Смита

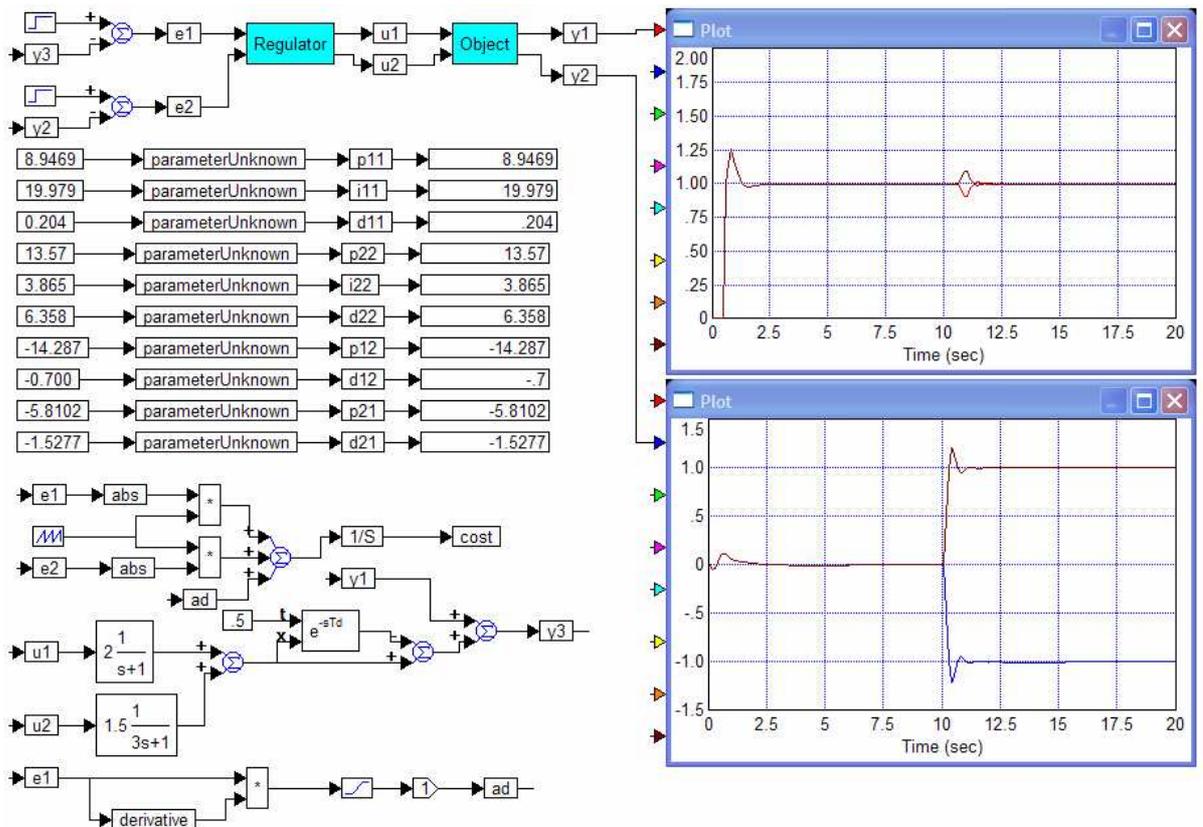


Рис. 14. Наилучший результат, полученный с упредителем Смита

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, показано, что применение упредителя Смита в сочетании с предложенной методикой оптимизации регулятора и особенностями его структуры дает значительный положительный эффект, состоящий в достижении малой ошибки при малом перерегулировании в системе для объекта с неблагоприятным сочетанием параметров его модели.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для системы с обратной связью. **Патент на изобретение** РФ RU 2368933 C1. G05B 11/14. Оpubл.27.09.09. Бюл. № 27. Заявка № 2008110243, Правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [2] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для многомерного объекта. **Патент на полезную модель** РФ RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Оpubл.10.05.10. Бюл. № 27. Заявка № 2009138894/22 от 20.10.2009, правообладатель: ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет и Институт лазерной физики СО РАН.
- [3] **Жмудь В. А., Семибаламут В. М., Воевода А. А.** Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. **Патент на изобретение** № 2457529. Приоритет от 11.01.2011. Заявка № 2011100407. Зарегистрировано 27.07.2012. Срок действия до 11.01.2031. Правообладатель: Учреждение РАН Институт лазерной физики Сибирского отделения (RU)
- [4] **Жмудь В. А.** Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [5] **Р.Ю.Ишимцев, А.А.Воевода, В.А. Жмудь.** Обводной канал для САУ скалярных и многомерных объектов: сравнение с упредителем Смита // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2008. 2(52). С.11-22.

- [6] **В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников.** Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.



**Вадим Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 250 научных статей, главный научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, измерительная техника.

E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)



**Олег Ядрышников** – аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор более 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.

E-mail: [oleg\\_yadr@mail.ru](mailto:oleg_yadr@mail.ru)

## Optimization of Regulator for Multi-Channel Objects with the Developing of the Idea of Smith's Predictor

Vadim ZHMUD, Oleg YADRISHNIKOV

*Abstract:* The problem of control of multi-channel objects in which the influence between many (all) inputs and many (all) outputs, it very important. That is so because such problems are often occur in a lot of real situations. With all that, analytic methods are developed only for linear systems immediately. The using of modeling and numerical optimization allows have a solution of this task more effectively. Nevertheless, in this case transient processes in the system have often not satisfactory quality because of the big overshooting. The developing of the idea of Smith predictor and by-pass channel for the multi-channel case with the using of the numerical optimization after that as well as the use of accordingly modified cost function allows proposing of the new methodic of control of multi-channel objects containing great delay. The methodic is tested on the example.

*Key words:* Automation, Regulators, Multi-channel Systems, Numerical Optimization, Modeling

# Процессы формирования наноструктур при осаждении кластеров на поверхность кристаллов с помощью компьютерного моделирования

А.М.Расулов<sup>1</sup>, А.А. Джурахалов<sup>2</sup>, И.Д. Ядгаров<sup>3</sup>, В.Г. Стельмах<sup>3</sup>, Д.К. Ахмадалиев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Андижанский Государственный Университет, г. Андижан, Узбекистан

<sup>2</sup>University of Antwerp, Antwerp, Belgium

<sup>3</sup>Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан

**Аннотация:** Методом компьютерного моделирования исследованы основные закономерности процесса осаждения кластеров на поверхности металлических монокристаллов при низких энергиях, механизмы образования наноструктур на поверхности металлов при осаждении кластеров и росте тонких плёнок.

**Ключевые слова:** Компьютерное моделирование, кластер, наноструктура, метод молекулярной динамики, взаимодействие, тонкие пленки, алгоритмы *Linked-Cell*.

## ВВЕДЕНИЕ

С точки зрения фундаментального естествознания исследования наноструктур позволяют расширить круг экспериментальных и теоретических приемов, традиционно применяемых, с одной стороны, для молекулярных систем, и с другой стороны, при исследованиях твердых тел или жидкостей. Сами наноструктуры при осаждении металлических кластеров эволюционируют: изменяются, растут, сливаются между собой и в конечном результате могут образовать сплошную тонкую плёнку на поверхности. Теоретическое изучение свойств этих плёнок представляет собой отдельное направление, в практическом плане эти тонкие плёнки представляют интерес, например, как защитные покрытия. Поэтому в последние годы все больший интерес экспериментаторов и теоретиков, работающих в области физики взаимодействия атомных частиц с поверхностью твердого тела, вызывает процесс взаимодействия кластерных частиц с поверхностью твердого тела с последующим образованием тонкой плёнки. Непрерывно совершенствующиеся экспериментальные методики позволяют в настоящее время получать уникальную информацию, в частности, уверенно измерять характеристики наноструктур и тонких плёнок на поверхности кристаллов. При увеличении размеров

осаждаемых кластеров можно приблизиться к получению одиночных наночастиц на поверхности металлов, уже достаточно активно используемых в новых технологиях.

## 1. МЕТОДЫ МАШИННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Исследование различных явлений с помощью моделирования на компьютерах стало в настоящее время признанным и быстро развивающимся направлением. В работе [1–4] показана роль машинного моделирования, т. е. компьютерных экспериментов по сравнению с обычным физическим опытом. Как видно из [1–4] преимущества компьютерных экспериментов по сравнению с физическим опытом гораздо больше, а также оно преобладает над необходимостью использования компьютерных экспериментов в научных исследованиях. Наряду с этим, компьютерные эксперименты – это методы экспериментального исследования именно физических систем, что определяет последовательность их проведения [5–9]. Следует отметить, что секрет успеха компьютерного эксперимента заключается в такой разработке модели в рамках перечисленных выше этапов, при которой модель достаточно детализирована, чтобы точно воспроизвести важные физические эффекты и все же не настолько подробно, чтобы сделать расчеты неосуществимыми. Выбор математического аппарата компьютерных экспериментов обуславливается тем, к какому типу принадлежит проводимый эксперимент. В настоящее время в материаловедении имеются пять «чистых» типов компьютерных экспериментов.

1. **Метод молекулярной динамики (ММД)** предназначен для решения задачи о движении отдельных атомов, описываемых как материальные точки, обладающие массой, в поле сил взаимодействия атомов друг с другом, инерциальных и внешних сил, прилагаемых к ТТ, частью которого являются исследуемые движущиеся атомы. Для рассматриваемых

частиц записывается система обыкновенных дифференциальных уравнений динамики Ньютона, для которой обычно решается задача Коши. Начальные условия Коши и граничные условия определяются той физической проблемой, которая исследуется в [7].

2. **Вариационный метод (ВМ)** используется для определения конфигурации атомов в положении устойчивого или неустойчивого равновесия вблизи дефектов кристаллической решетки (КР). Он основан на определении координат атомов, при которых суммарная энергия системы становится минимальной. Многочисленные примеры использования ВМ показывают, что он вполне применим для изучения статических атомных конфигураций, связанных с точечными дефектами, имеющими малый объем. Однако он не так хорошо применим к изучению линейных и плоских дефектов, и существует тенденция использовать ММД, а не ВМ при изучении, например, дислокаций, дефектов упаковки, границ зерен и трещин [8, 9].

3. При расчетах **методом Монте-Карло** последовательность актов двойного обмена местами частиц генерируется, согласно матрице вероятностей условных переходов, которая определяется выбранным потенциалом межчастичного взаимодействия. Конечная цель большинства вычислений по методу Монте-Карло состоит в получении среднего значения данной переменной или распределения значений, которые переменная может принять. В основном этот метод используется для изучения равновесных конфигураций в жидкостях и сплавах, а также для выбора начальных условий в ММД [7].

4. В **методе развития картин изображения** главная цель – генерирование геометрических картин из линий или точек, соответствующих определенной совокупности геометрических связей. Эти расчеты использовались для моделирования вида изображения в автоионном микроскопе при изучении роста несовершенства КР, для генерирования дислокационных линий, связанных с критическим напряжением сдвига для некоторого расположения дислокационных барьеров [3, 4].

5. В последнее время для описания процессов, связанных с отжигом и перераспределением дефектов после облучения, все чаще стали использоваться компьютерные модели, математическим аппаратом которых служат **уравнения типа химической кинетики**. Модели этого метода, получившего название кинетического, являются макроскопическими и предназначены в основном для описания кинетики точечных дефектов и комплексов. Физическая модель данного метода – теория скоростей химических реакций [8].

Для теоретического представления и понимания механизмов образования нанострук-

тур с последующим формированием плёнок при осаждении на поверхность кристаллов различных металлических кластеров, предпочтительным является использование первых двух методов. ВМ имеет преимущество перед ММД, так как позволяет без значительных вычислительных затрат получать равновесные конфигурации атомов. Недостаток ВМ в том, что невозможно отследить траектории атомов и, следовательно, поведение всей системы с момента приложения сил воздействия до прихода системы в равновесное состояние. Ограничения на размер вычислительной ячейки (число атомов) и время моделирования являются существенным недостатком ММД и заставляют сузить область задач, которые адресуются ММД.

## 2. МЕТОД МОЛЕКУЛЯРНОЙ ДИНАМИКИ

Как сказано выше, в настоящем проекте используется метод молекулярной динамики. С помощью этого метода моделируется динамическое поведение систем многих частиц, и наблюдаются их качественные свойства. Поведение систем может описываться гамильтонианом, лагранжианом или непосредственно уравнениями движения Ньютона. В классической механике гамильтониан приводит к различным формам уравнений движения, в частности к уравнению Ньютона:

$$\frac{d^2 r_i(t)}{dt^2} = \sum_{i \neq j} \frac{F_i(r_{ij})}{m}, \quad (1)$$

где  $F_i$  – сила, действующая на  $i$ -й атом со стороны атомов окружения и падающего иона, вычисляется как векторная сумма:

$$\vec{F}_i = -\sum_j \frac{\partial}{\partial r_i} V(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|), \quad (2)$$

и  $V(r_{ij}) = V(|\vec{r}_i - \vec{r}_j|)$  – двухчастичный потенциал межатомного взаимодействия.

Решение дифференциального уравнения (1) аналитически получается двойным интегрированием по времени от нуля до  $t$ , что дает сначала скорости частиц, а затем их координаты. При этом требуется знание не только начальных координат частиц, но их начальных скоростей. Начальные положения частиц задают вклад потенциальной энергии в полную энергию системы, а скорости определяют вклад кинетической энергии. С заданными начальными условиями система движется по траектории с постоянной энергией в фазовом пространстве.

**Метод вложенного атома (Embedded Atom Method) для металлических систем**

Как сказано выше, потенциалы являются парными, даже если дополнительно зависимость плотности не может обеспечить адекватное описание металлических систем. Альтернативный и простой, но, видимо, более реалистичный подход к описанию соединения в металлических системах основывается на концепции локальной плотности, которую рассматривают как основную переменную. Это позволяет объяснять зависимость силы индивидуальных связей локальной окружающей среде, которая особенно важна для моделирования поверхностей и дефектов.

Многие методы, которые были предложены в начале 1980-х годов, имеют различные названия, например, метод вложенного атома, *g. embedded-атома - EAM*, теория эффективной среды, потенциал Файнеса-Цинклера, модель слипания, уточненный эффективный средний потенциал (*CEM*), и т. д., а также, например, модель сильной связи, теория эффективной среды. В результате приходим к следующему выражению для полной энергии системы из  $N$  атомов:

$$E_{tot} = \sum_i E_i$$

$$E_i = F_i(\rho_i) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \phi_{ij}(r_{ij})$$

$$\rho_i = \sum_{j \neq i} f_j(r_{ij}), \quad (3)$$

Интерпретация и функциональная форма  $F$ ,  $f$ , и  $(\phi)$  и зависит от особенностей метода. С точки зрения теории эффективной среды или метода вложенного атома, энергия атома с номером  $i$  определяется локальной электронной плотностью в позиции атома, и функции  $f$  описывают вклад в электронную плотность

$$\vec{F}_i = -\vec{\nabla}_{r_j} E_{tot} = -\sum_{j \neq i} \left[ \frac{\partial F_i(\rho_i)}{\partial \rho_i} \frac{\partial f_j(r_{ij})}{\partial r_{ij}} + \frac{\partial F_j(\rho_j)}{\partial \rho_j} \frac{\partial f_i(r_{ij})}{\partial r_{ij}} + \frac{\partial \phi_{ij}(r_{ij})}{\partial r_{ij}} \right] \frac{(\vec{r}_i - \vec{r}_j)}{r_{ij}}$$

Для расчета расстояния между частицами  $r_{ij}$  необходимо вычислить энергию и силы - вычисление почти столь же просто и эффективно, как потенциалы парной связи. Потенциал *EAM* может быть назван как парный потенциал, который зависит от окружающей среды. Отсутствие явных условий для задачи трёх тел, требует проектирования потенциалов для металлов, где ковалентные эффекты важны. В так называемом измененном *EAM* (*MEAM*) Баскесом или расширенным *EAM* (*EEAM*) Джонсоном, для расчета угловой зависимости функции электронной плотности ( $\rho_0$ ) вводит-

межузельного атома с номером  $i$  из общего числа всех атомов  $j$ . Сумма по функции  $f$  поэтому измеряется локальной электронной плотностью  $\rho_i$  (энергия внедрения, энергия обрезания).

Связанная энергия  $F$  является энергией, которая связана с положением атома в электронной плотности и описывается функцией  $\rho$ . Член парного потенциала ( $F_i$ ) описывает электростатические вклады. Общую форму потенциала можно рассмотреть как обобщение основной идеи относительно Теории функционала плотности (*Density Functional Theory, DFT*) - локальная электронная плотность может использоваться для расчета энергий.

**Вложенный атом и связанные методы для металлических систем**

В дополнение к наличию различных физических интерпретаций, различные методы отличаются путем функции определения. Некоторые авторы получают функции и параметры из расчета «первых принципов вычислений», другие предполагают функции из согласования параметров с экспериментальными данными. Обычно результаты аналогичны.

Основное преимущество этих методов по потенциалам парной связи - способность описать изменение сильной связи по координате. Увеличение координаты уменьшает силу каждой индивидуальных «связей» и увеличивает длину «связи».

$$E_i = F_i \left( \sum_{j \neq i} f_j(r_{ij}) \right) + \frac{1}{2} \sum_{j \neq i} \phi_{ij}(r_{ij}), \quad (4)$$

Чтобы использовать этот потенциал в моделировании MD, мы должны найти силы:

ся локальная симметрия межатомной связи.

Потенциалы *MEAM* разработаны для кубического кристалла и для плотноупакованных металлов, ковалентной связи *Si* и *Ge*. Более поздние методы, разработанные Баскесом, включают соответствие с *MEAM* для *Ni*, Леннарда-Джонса основанной на *EAM*.

Пример потенциала *EAM*: *R.A.* Потенциал Джонсона для *Ni*. Чтобы определять потенциал *EAM*, мы должны определить три функции, функция обрезания  $F(\rho)$ , потенциал пары связи  $\phi(R_{ij})$ , и функция электронной плотности  $f$ . Ниже графически приведены эти функции и их

производные для потенциала *Johnsona EAM* с соответствующими параметрами для *Ni* (см. рис. 2).

Если  $F(\rho)$  – линейная функция  $\rho$ , это имеет место только парного потенциала. Эффекты для многих тел связаны с кривизной функции  $F(\rho)$ . Для функции  $F$  с положительной кривизной и положительным уменьшением  $f$ , эффективный потенциал становится более отталкивающим по мере увеличения плотности. Эта тенденция предсказана всеми физическими картинами,

которые приводят к этому типу потенциала.

Из рис. 3 видно, что область применимости ММД является:

- 1) «квантовый» ММД: область длины: 0–5 нм; шкала времени: (1 фс – 1 пс);
- 2) «классический» ММД: область длины: 5–100 нм; шкала времени: (1 фс – 1 пс);
- 3) Запись моделирования МД: область длины: (1 нм – 1 мкм); шкала времени: (1 фс – 1 пс).

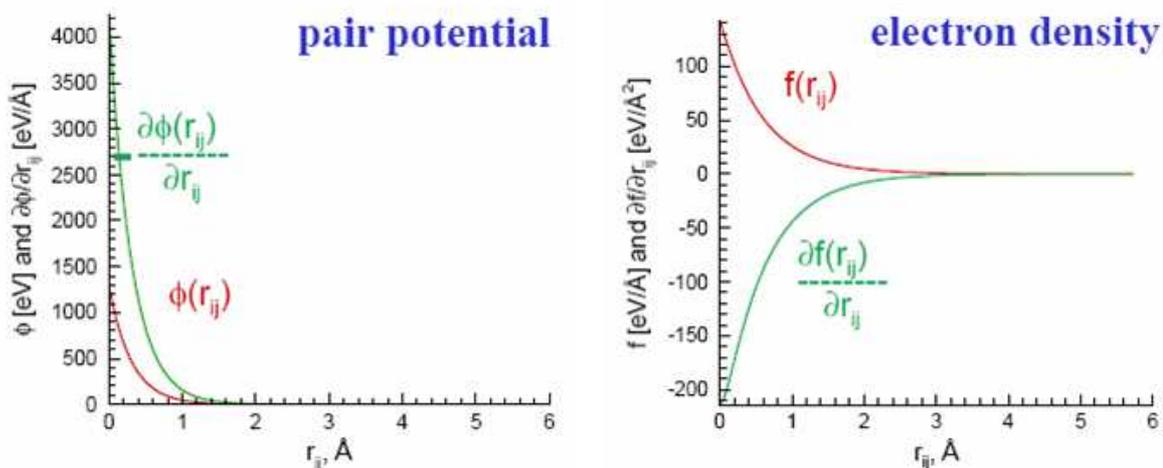


Рис. 2. Зависимость парного потенциала, электронной плотности и функции обрезания от межатомного расстояния

Следует отметить, что ММД и анализ результатов, до сих пор используется во многих исследованиях [1–5] современного моделирования МД.

Со времени введения ММД, он успешно используется для исследования широкой области задач в различных исследовательских сферах. В работах [2–4] в расчетах ММД с использованием многочастичного потенциала методом вложенных атомов (EAM) было проведено моделирование эмиссии кластеров  $Ag_n$  при распылении серебра ионами  $Ag^+$  с  $E = 250 - 5000$  эВ. Для кластеров  $Ag_3$ ,  $Ag_4$ ,  $Ag_5$ , как показали расчеты, характерны достаточно широкие распределения по энергиям возбуждения, а средние значения внутренней энергии  $E_{int}$  соответственно равны 2,9 эВ; 4,5 эВ и 6,1 эВ.

Важным результатом расчетов явилось то, что эти величины существенно не зависят от энергии первичных ионов во всем исследованном диапазоне. Было показано также, что большинство распыленных кластеров нестабильно. При этом среднее время, необходимое кластерам для перехода в стабильное состояние путем последовательной фрагментации отдельных атомов или молекул, практически не зависит от размера кластера и оценивается величиной  $\sim 10$  пс. Использование ММД позволило А. Вухеру и Б. Гаррисону также

получить в распределения распыленных димеров  $Ag$  по колебательным и вращательным состояниям, причем данные оценки касаются как частиц, рассматриваемых непосредственно после эмиссии («первичных»), так и образовавшихся в процессе мономолекулярной фрагментации более крупных кластеров («вторичных»). Показано, что для распыленных димеров характерны энергии возбуждения порядка нескольких тысяч градусов Кельвина, причем внутренние энергии «вторичных» частиц оказываются значительно ниже. В работе [1] сообщается о МДМ эмиссии кластеров при распылении металлов с использованием потенциала многих тел, разработанного «из первых принципов» Де Присто с сотрудниками. Для конкретного случая серебра в качестве материала мишени показано, что этот потенциал позволяет гораздо более реалистично описать малые кластеры, чем потенциал EAM. В то же время данные работы, в которой большой коллектив авторов проводит сравнение результатов компьютерного моделирования, полученных в различных группах, свидетельствуют о значительной близости данных результатов между собой. Следовательно, в настоящее время можно говорить о некоей общей картине процессов образования и эмиссии кластерных частиц под действием ионной бомбардировки, получаемой на основе использования данного

метода.

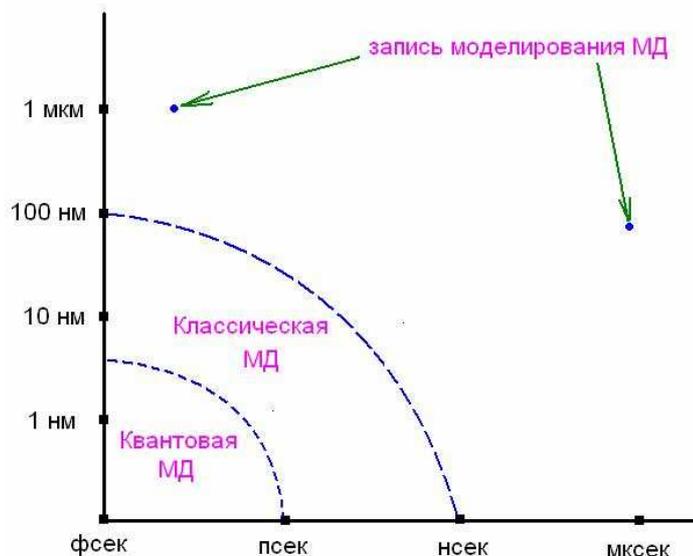


Рис. 3. Область применимости ММД во временной и размерной шкале длины

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

При моделировании процессов происходящих на поверхности кристалла полученные результаты при бомбардировке атомами разных типов, сильно зависят от модели реального кристалла. В модели идеального кристалла каждая частица (или атом) характеризуется только координатами, а в реальности кроме координат учитывается и скорость (импульс) (рис. 4).

Переход от модели идеального кристалла к реальному кристаллу происходит в 3 этапа:

1. Создание модели идеального кристалла;
2. Дампирование идеального кристалла;
3. Термализация дампованного кристалла до определенной температуры.

На первом этапе с помощью специальной программы создается необходимый тип кристалла. После этого для упрощения последующих расчетов, используются алгоритмы *Linked-Cell* и *Verlet neighbours*. На основе этих алгоритмов атомы кристалла можно зафиксировать, распределить по группам, а также определить их соседей. С помощью этих алгоритмов можно решить следующие задачи:

- а) выбор потенциала взаимодействия между атомами;
- б) перемещение элементарной части кристалла в выбранном направлении;

На втором этапе осуществляется процесс

дампирования модели идеального кристалла. На основе этого процесса идеальный кристалл превращается в реальный кристалл с температурой  $T = 0^\circ\text{K}$ . В этом случае каждый атом кристалла имеет координату и скорость (импульс). Атомы кристалла двигаются не поступательно, а только колеблются вокруг оси.

На третьем этапе происходит процесс термализации дампованного кристаллу с температурой  $T = 0^\circ\text{K}$ . Постепенно передавая энергию, разогреваем его до температуры  $300^\circ\text{K}$ .

Металлические кластеры ( $\text{Ag}_n$  и  $\text{Co}_n$ ,  $n = 2 - 18$ ) моделировались компьютерной программой, основанной на методе Монте-Карло и ММД. Сначала определялась равновесная конфигурация при температуре кластера  $300^\circ\text{K}$ , а затем кластеры «разогревались» до более высоких температур. Малые  $\text{Co}_{10}\text{Ag}_{201}$  кластеры с начальными энергиями (0,25 – 1,5 эВ) падает на поверхности  $\text{Ag}(100)$  (рис. 5). С увеличением начальных энергий атомов кластеры больше внедряются в кристаллы.

При значении энергии  $E = 1,0$  эВ кластеры атомов внедряются во второй слой, а при значении энергии  $E = 1,5$  эВ внедряется на третий слой и повторяет структуру кристалла.

На рис. 6 приведен график зависимости температуры (а) и давления (б) монокристалла серебра от времени.

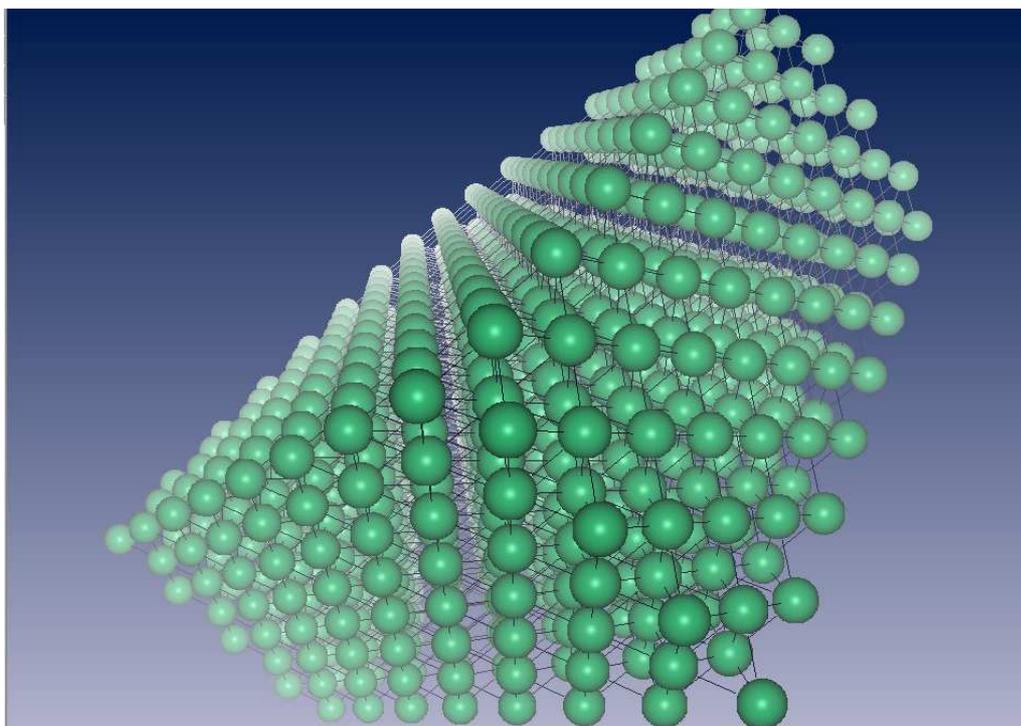


Рис. 4. Вид модели кристалла на плоскости (100)

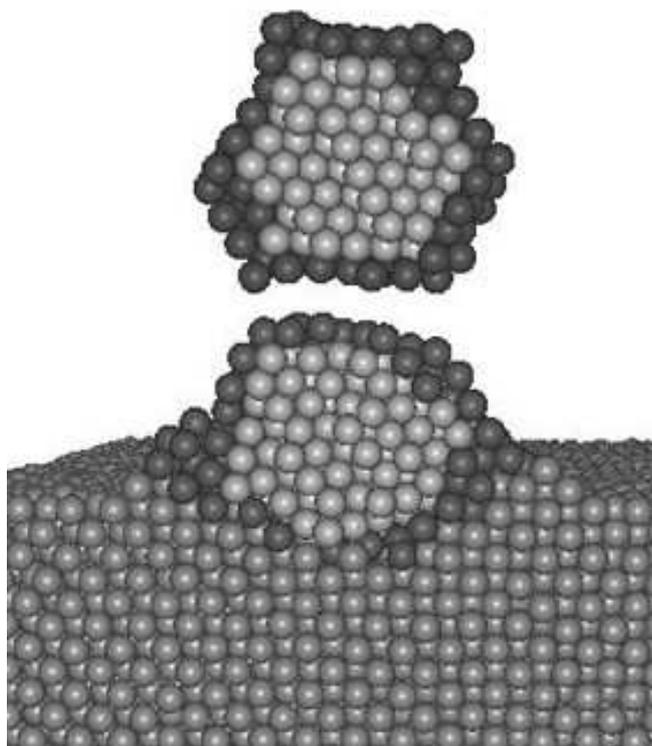


Рис. 5. Кластеров  $Co_{10}Ag_{201}$  до и после падения в поверхности  $Ag$  (100)

Из этого графика видно, что для того, чтобы кристалл с температурой  $T = 300 \text{ }^\circ K$  пришел к стабильному состоянию необходимо время  $5 \text{ ns}$ . Известно, что с повышением температуры объем кристалла увеличивается. Поэтому для разных температур соответственным образом приходится выбирать постоянную

кристаллической решетки. Для расчета координат и скоростей атомов кристалла нами использован алгоритм Своба.

Изучались начальная и конечная конфигурации кластеров, структурные факторы от времени, электрон-фононные свойства и корреляционные функции.

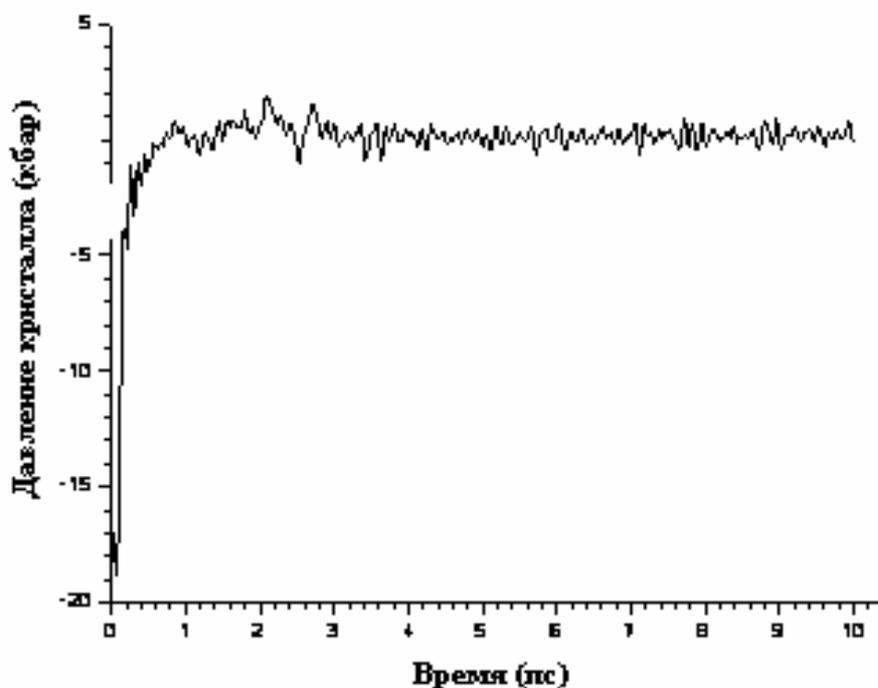
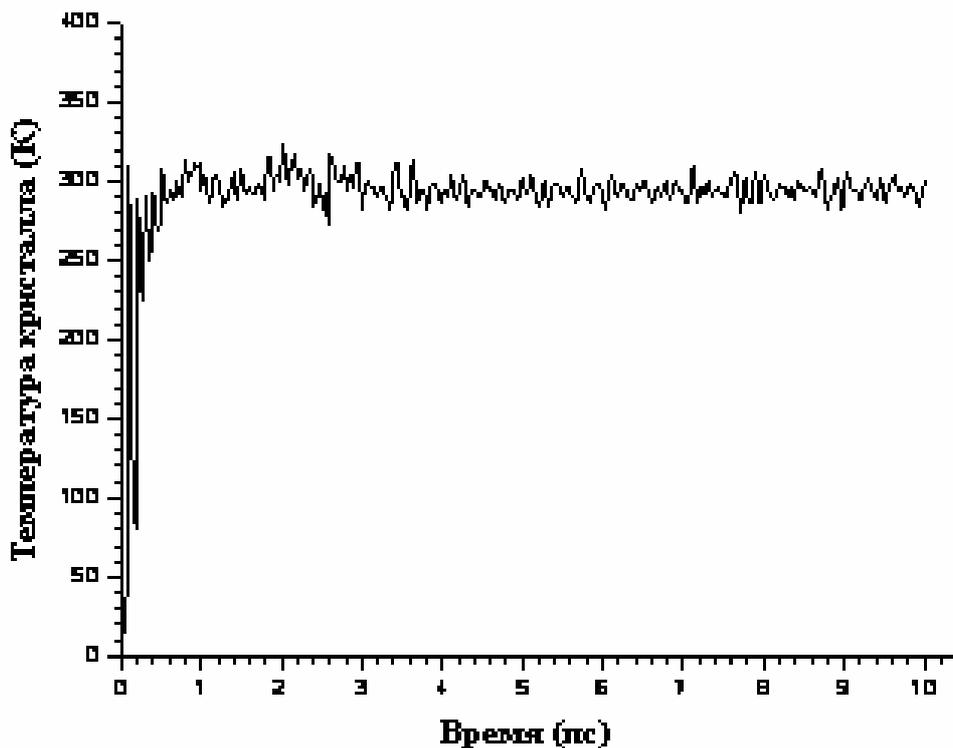


Рис. 6. Зависимости температуры (а) и давления (б) монокристалла серебра от реального времени

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] M. Hou, V.S. Kharlamov and E.E. Zhurkin; Phys. Rev. **B66**, 195408-1 (2002)
- [2] A. Dzhurakhalov, A. Rasulov, T. Van Hoof, M. Hou, The European Physical Journal, **D31**, 53-61 (2004)
- [3] P. Moskovkin and M. Hou; Eur. Phys. J. **D27**, 231 (2003)
- [4] B. Degroote, A. Vantomme, H. Pattyn, K. Vanormelingen; Phys. Rev. **B65**, 195401 (2001)
- [5] B. Degroote, A. Vantomme, H. Pattyn, K. Vanormelingen, M. Hou; Phys. Rev. **B65**, 195402-1 (2001)
- [6] T. Van Hoof, M. Hou; Eur. Phys. J. **D29**, 33 (2004)

- [7] Q. Hou, M. Hou, L. Bardotti, B. Prével, P. Mélinon and A. Perez; Phys. Rev. **B62**, 2825 (2000)  
[8] W.C. Swope, H.W. Andersen, P.H. Berens, K.R. Wilson; J. Chem. Phys. **76**, 1 (1982).  
[9] D.J. Oh, R.A. Johnson; J. Mater. Res. **3**, 471 (1988); R.A. Johnson, Phys. Rev. **B 39**, 12554 (1989)

**Расулов А.М.** – д.ф.-м.н., профессор кафедры Информатика Андижанский Государственный Университет  
E-mail: [arasulov59@mail.ru](mailto:arasulov59@mail.ru)

**Джурахалов А.А.** – д.ф.-м.н., профессор University of Antwerp  
E-mail: [dzhurakhalov@mail.ru](mailto:dzhurakhalov@mail.ru)

**Ядгаров И.Д.** – к.ф.-м.н., с.н.с., Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз  
E-mail: [iyadgarov@mail.ru](mailto:iyadgarov@mail.ru)

**Стельмах В.Г.** – н.с., Институт ионно-плазменных и лазерных технологий АН РУз  
E-mail: [stel@mail.ru](mailto:stel@mail.ru)

**Ахмадалиев Д.К.** - н.с., кафедры Информатика

Андижанский Государственный Университет  
E-mail: [ilmiyor@mail.ru](mailto:ilmiyor@mail.ru)

### **Processes of Forming of Nano-Structures during Concretion of Clusters to Surface of Crystals with the Helps of Computer Modeling**

A.M. RASULOV, A.A. DZHURAKHALOV,  
I.D. YADGAROV, V.G. STELMAKH

*Abstract:* A report is presented by computer simulation method about progress in the understanding of the properties of metallic nano-dimension particles, their interaction with surfaces subsequent to low energy slowing down and the properties of nano-structured materials formed with these particles.

*Key words:* Computer simulation, cluster, nanostructure, method molecular dynamics, introduction, thin films, Linked-Cell algorithm.

# Эффективность полноты ПИД-регулятора при управлении многоканальным объектом

Вадим Жмудь, Олег Ядрышников

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** При управлении многоканальными объектами со многими перекрестными связями зачастую используются неполные ПИД-регуляторы, то есть регуляторы, содержащие пропорциональный, интегрирующий и дифференцирующий элементы только в главных диагоналях. В остальных элементах такого регулятора интегрирующий тракт отсутствует. Логика такого выбора основана на том, что для обеспечения астатизма управления  $N$  выходными величинами достаточно использования  $N$  интеграторов. Однако исследования показали, что в некоторых случаях такой подход ограничивает возможности совместного достижения требуемой динамической и статической точности. Сопоставление достижимых результатов управления осуществлено на примере.

**Ключевые слова:** автоматика, регуляторы, многоканальные системы, численная оптимизация, моделирование

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В серии статей по численной оптимизации регуляторов [1–2], а также в монографии [3] рассматриваются приемы и методики, позволяющие получить численные параметры регуляторов по известной модели объекта. При этом в случае использования многоканального объекта рекомендуется использование неполного ПИД-регулятора, а именно: интегратор рекомендуется применять только в прямом контуре управления, то есть в главной диагонали матричной передаточной функции регулятора. В остальных элементах рекомендуется использование ПД-регуляторов. Такой подход оправдан с позиции следующих соображений:

1. Наличие интегратора в главной диагонали теоретически достаточно для обеспечения астатического управления.

2. Указанное упрощение позволяет исключить несколько неизвестных коэффициентов. Например, при управлении объектом размерности  $2 \times 2$  вместо двенадцати коэффициентов достаточно отыскать лишь десять; при управлении объектом размерности  $3 \times 3$  вместо 27 коэффициентов достаточно отыскивать только 21 коэффициент.

В данной статье исследуется

целесообразность такого упрощения на примере, объекта с близкими параметрами элементов матричной передаточной функции. Такая модель объекта является одним из наиболее проблемных вариантов, особенно, при наличии запаздывания.

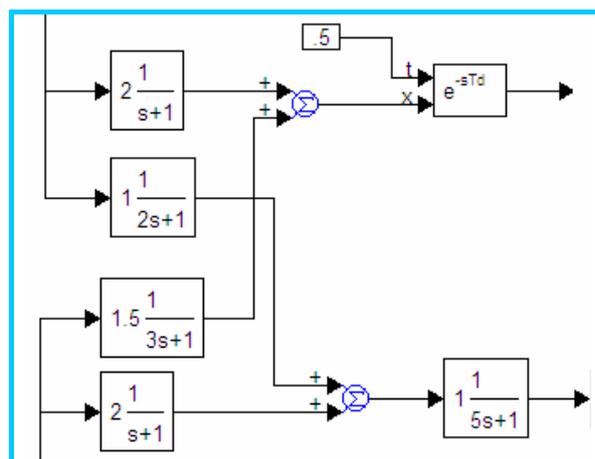
## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОД ЕЕ РЕШЕНИЯ

Пусть передаточная функция объекта задается произведением двух матриц:

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{2}{s+1} & \frac{1}{2s+1} \\ \frac{1,5}{3s+1} & \frac{2}{s+1} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$W_2(s) = \begin{bmatrix} \exp(-0,5s) & 0 \\ 0 & \frac{1}{0,2s+1} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

На *рис. 1* показана структурная схема такого элемента при моделировании его в программе *VisSim*.



*Рис. 1.* Структура объекта

Методами численной оптимизации в программе *VisSim* будем исследовать возможности управления при использовании двух вариантов регуляторов, а именно: регулятор с неполной структурой, показанной на *рис. 2*, и регулятор с полной структурой, показанный на *рис. 3*.

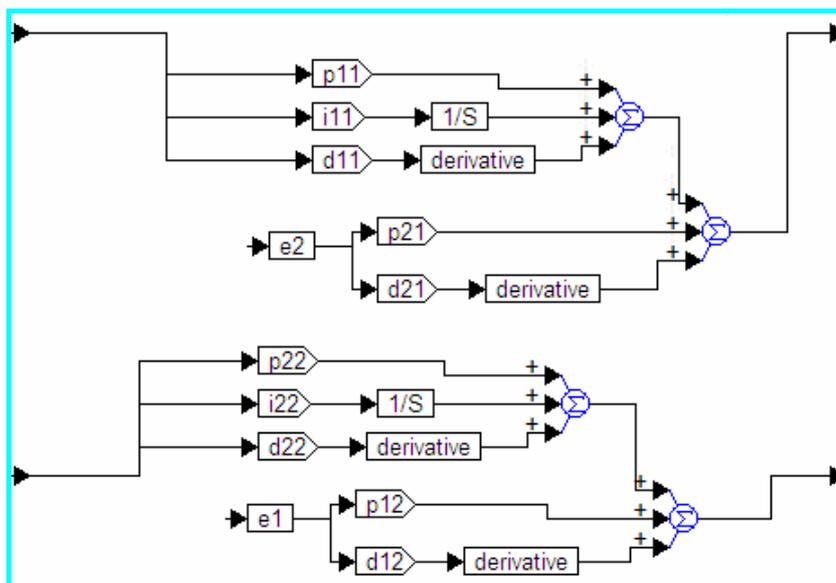


Рис. 2. Структура регулятора (ПИД в главных диагоналях и ПИ в неглавных диагоналях)

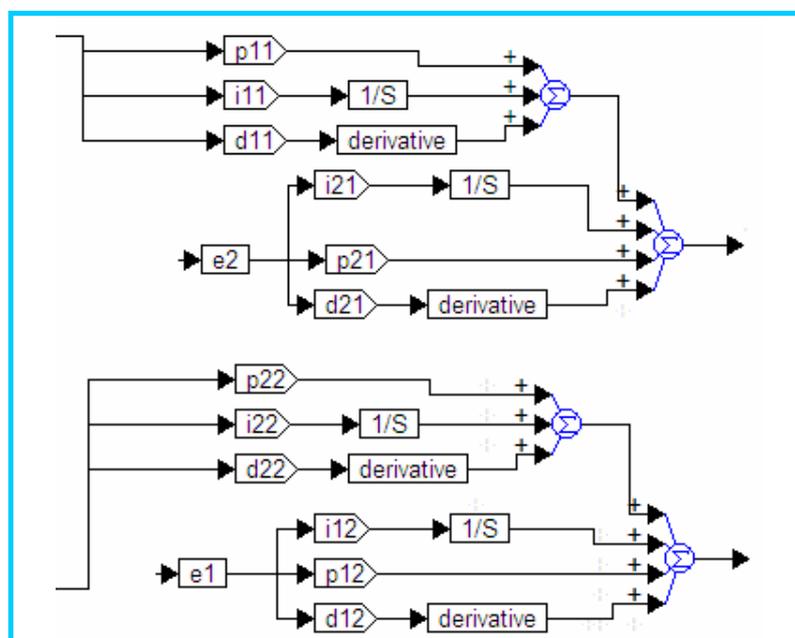


Рис. 3. Структура полного ПИД-регулятора

Рассмотренный пример с упрощенной структурой детально исследован в статье [3]. Результат показан на рис. 4, где приведена структура для моделирования всей системы и показаны переходные процессы при раздельной подаче ступенчатых входных воздействий с разницей во времени, равной половине времени моделирования, то есть 20 с.

Перерегулирование в первом канале составляет от 10 до 35 %. Перерегулирование во втором канале составляет около 10 % при подаче ступенчатого воздействия на первый вход, то есть в данном случае речь идет о перекрестном влиянии первого канала на второй.

С другими параметрами регуляторов можно

обеспечить меньшее значение перерегулирования в каналах, но при этом не обеспечивается требуемая статическая точность, в частности, во втором канале в этом случае статическая ошибка слишком велика и возрастает с течением времени [3].

На рис. 5 показаны результаты оптимизации той же системы при использовании полной структуры ПИД-регулятора.

Как видим из рис. 5, вследствие оптимизации обеспечивается высокое быстродействие, но большое перерегулирование, а именно: в первом канале оно превышает 150 %, во втором канале около 80 %.

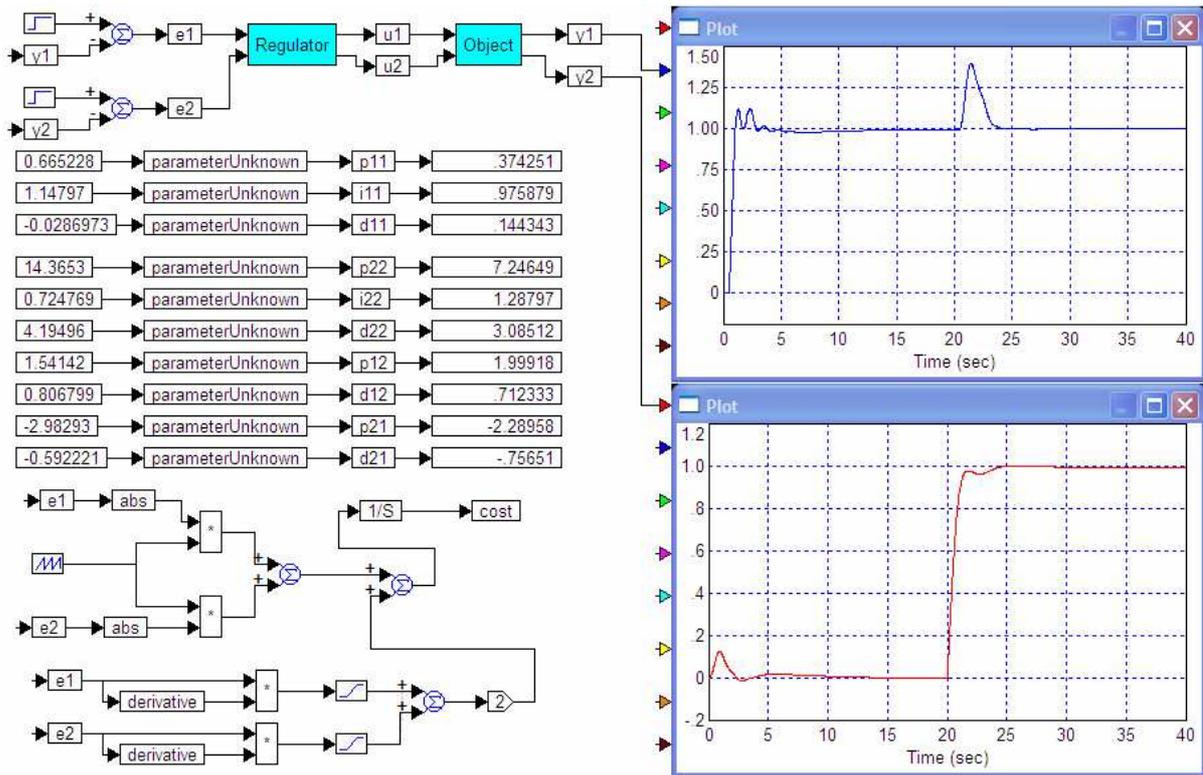


Рис. 4. Наилучший результат, полученный с упрощенной структурой ПИД-регулятора [7]

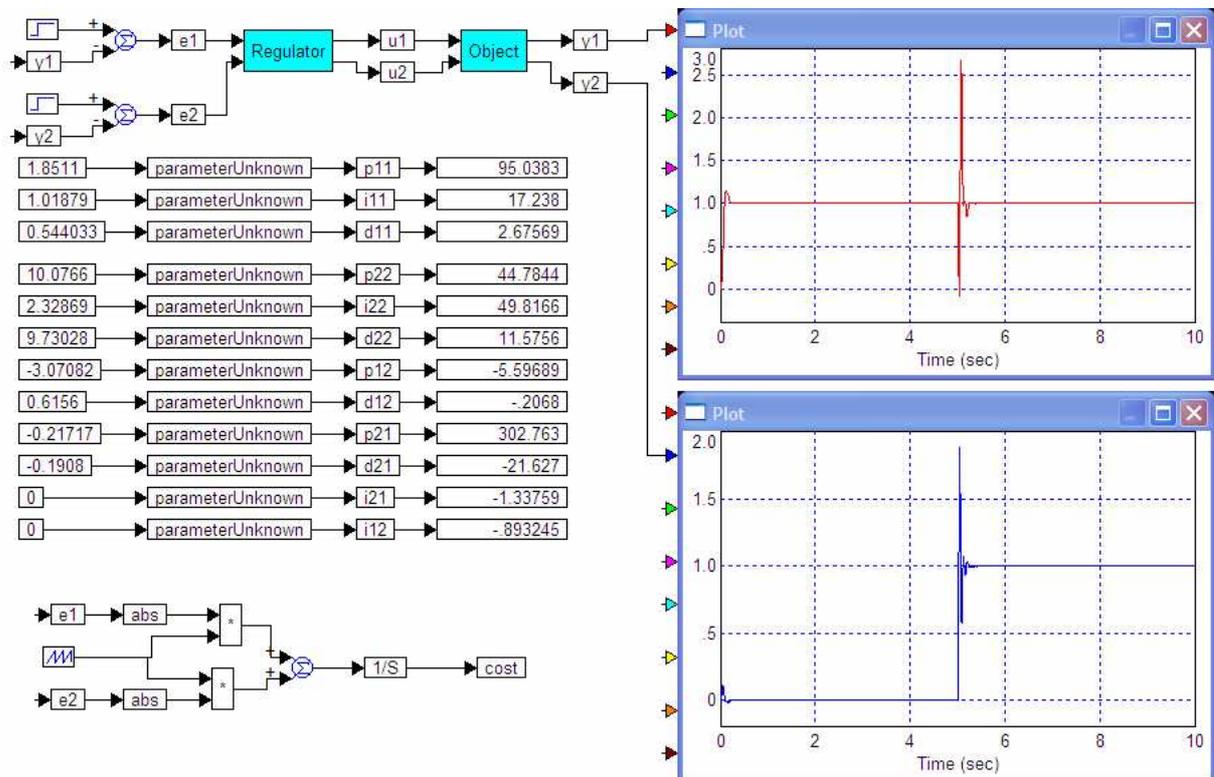


Рис. 5. Результаты оптимизации системы при использовании полного ПИД-регулятора

Данный результат, показанный на рис. 5, получен без использования детектора правильности движений [3], в отличие от результата, показанного на рис. 4. Поэтому для корректного сравнения двух видов регуляторов следует во втором случае также применить детектор правильности движения, то есть слагаемое в целевой функции, которое резко возрастает, если произведение какой-либо из ошибки на ее производную положительно.

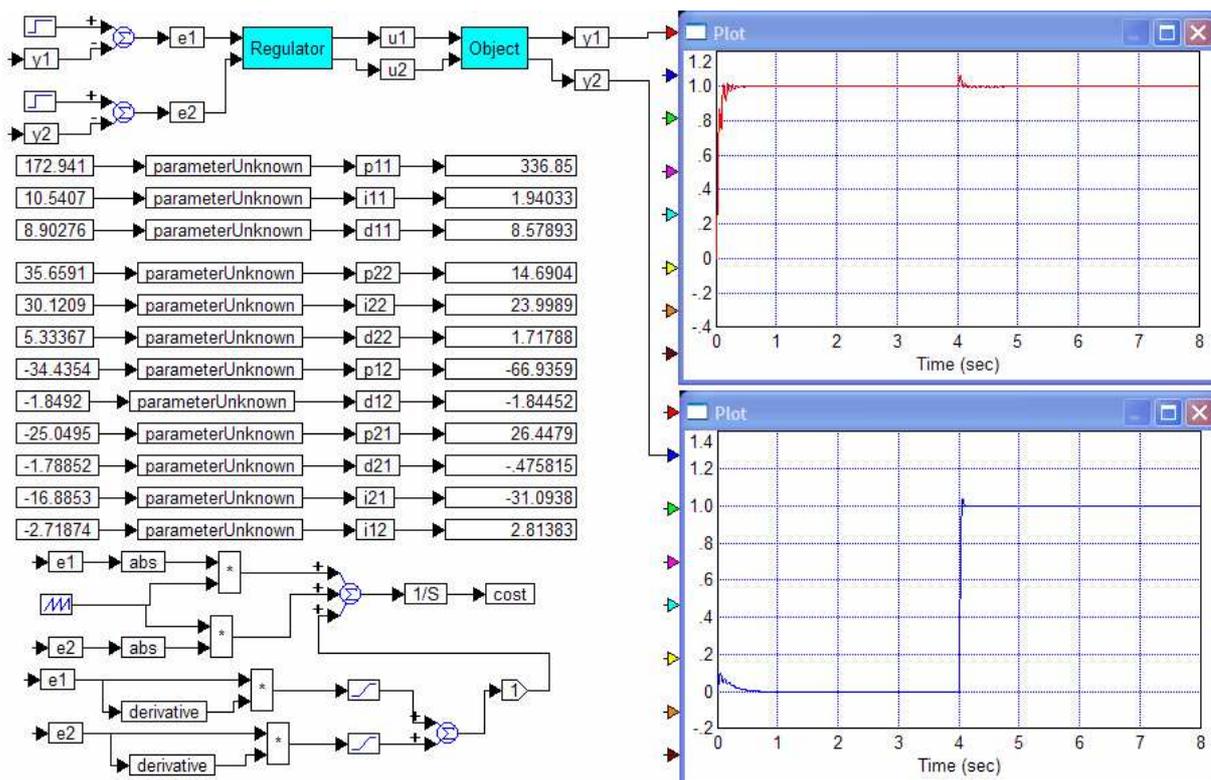


Рис. 6. Результаты оптимизации системы при использовании полного ПИД-регулятора при введении детектора правильности движений

Как видно из рис. 6, обеспечено снижение перерегулирования до величины порядка 2 %.

Таким образом, показано, что, по меньшей мере, в некоторых случаях использование полной структуры ПИД-регулятора более эффективно, чем использование сокращенной структуры.

## ЛИТЕРАТУРА

- [7] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
- [8] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упреждителя Смита. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 57–67.
- [9] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.



**Вадим Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 250 научных статей, главный научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, измерительная техника.  
E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)



**Олег Ядрышников**, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор более 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, оптимальные и адаптивные системы, оптимизация, многоканальные системы.  
E-mail: [oleg\\_yadr@mail.ru](mailto:oleg_yadr@mail.ru)

## Effectiveness of PID-regulator Fullness for Control of Multi-Channel Objects

Vadim ZHMUD, Oleg YADRISHNIKOV

*Abstract:* In the solution of the problem of control of multi-channel objects which has many crossing connections truncated PID-regulators are often used, which has proportional, derivative and integrating elements only in the main diagonal. In the rest channels of such regulator integrating element is absent. Logic of such choice is based on the proposition that for astatic control of  $N$  output values it is sufficient of the using of  $N$  integrators. But the researches indicated that in some cases such approach restricts the possibilities of the joint achievement of demanded dynamic and static accuracy. The comparing of the control results is tested on the example.

*Key words:* Automation, Regulators, Multi-channel Systems, Numerical Optimization, Modeling

## **IV. Измерительные средства и системы**

## Содержание раздела:

- С.М. Алфёров, А.М. Кориков. Автоматизация процесса градуировки шкал манометров (Сибстрин и НГТУ, Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 82–92.

# Автоматизация процесса градуировки шкал манометров

С.М. Алфёров, А.М. Кориков

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР, Россия)

**Аннотация:** Проведен системный анализ технологических процессов (ТП) сборки и настройки манометров, определены недостатки существующего ТП. Предложена реализация этапов автоматизации ТП индивидуальной градуировки манометров: автоматизированный стенд (АС), устройство сопряжения компьютера с клапанами, система управления давлением (СУД), датчик угла наклона стрелки, программа печати шкалы. Основной компонентой АС для регулировки манометров является гидравлическая установка (задатчик давления (ЗД)), предназначенная для равномерной подачи и сброса давления на регулируемые манометры. При моделировании процессов, протекающих в ЗД, обнаруживаются нелинейности, затрудняющие аналитическое исследование процессов настройки. Рассмотрены варианты линеаризации процессов регулировки. Обоснованы рекомендации по синтезу алгоритмов СУД, автоматизации и роботизации ТП.

**Ключевые слова:** Управление, автоматизация, моделирование, манометр, настройка.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Манометрические приборы применяются во многих областях человеческой деятельности: промышленность, транспорт, бытовая техника, научные исследования и т.д. Конкуренция производителей в данной области приборостроения высока и заставляет предприятия развиваться в направлении повышения качества выпускаемой продукции, осваивать новые технологии и осуществлять автоматизацию процессов изготовления и выпуска манометров. В этом направлении проделан большой объем научных исследований, отраженный частично в работах [1-3]. Первые результаты применения автоматизированной технологии регулировки стрелочных манометров в отечественной практике производства манометров изложены в [1]. В этой работе описан стенд для автоматизированной регулировки узлов манометров с трубкой Бурдона по одному параметру путем измерения характеристик чувствительного элемента и обработки механизма по вычисленному регулировочному параметру (координаты крепежного отверстия к чувствительному элементу). В [2] предложен

проект системы автоматизированной регулировки манометров с помощью нанесения шкал. Поиск оригинальных технических решений проблемы автоматизации сборки и регулировки манометров продолжается и, в частности, соавтором данной статьи Алфёровым С.М. совместно с сотрудниками ОАО «Манотомь» разработан способ индивидуальной градуировки шкал манометров и устройство для его осуществления [3]. За рубежом конкурирующие системы называются автоматизированными системами калибровки манометров. На выставках и ярмарках эти системы и их компоненты предлагаются многими зарубежными компаниями: WIKA Alexander Wiegang GmbH&Co.KG, Fluke Corporation и др. В частности фирма WIKA Alexander Wiegang GmbH&Co.KG предлагает сверхточный датчик высоких давлений CPC8000-H ([www.wika.de](http://www.wika.de)). По уровню технологического развития российские предприятия и, в частности ОАО «Манотомь», значительно уступают зарубежным компаниям, но зарубежные производители явно проигрывают отечественным по цене производимых манометрических приборов. Для повышения конкурентоспособности отечественных манометрических приборов необходимо повысить уровень технологического развития российских предприятий, повысить качество и класс точности производимых манометров.

## II. МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГРАДУИРОВКИ МАНОМЕТРОВ

### 2.1. О задаче автоматизации процесса регулировки манометров

Основой манометрических приборов является упругий чувствительный элемент, который представляет собой трубку, способную упруго деформироваться под влиянием разности между внутренним и внешним давлениями. Деформация трубчатой пружины сопровождается перемещением наконечника, которое служит мерой разности упомянутых давлений. Трубчатая пружина была предложена французом Бурдоном еще в 1851 г. и до настоящего времени приборы для измерения

давления на ее основе являются наиболее распространенными.

За внешней простотой технических манометров скрываются очень высокие требования по точности изготовления деталей и узлов. В производственных условиях выполнить эти требования в полном объеме не всегда удается, что приводит к операциям регулировки манометров, т.е. к подбору значений регулируемых кинематических звеньев механической системы. Этот процесс на отечественных предприятиях, в частности на ОАО «Манотомь», выполняется вручную, является трудоемким, требует большого опыта регулировщика и существенно увеличивает себестоимость прибора. Попытки автоматизации процессов настройки и градуировки манометрических приборов предпринимались и ранее, однако предложенные решения оказались экономически не выгодными, поэтому на ОАО «Манотомь» до настоящего времени используется механизированная регулировка, т.е. регулировка с использованием компрессоров или масляных насосов для задания давления. Ручная настройка манометров является трудоемкой технологической операцией и занимает около 30% времени сборки приборов. Класс точности манометра и, в конечном итоге, качество выпускаемой продукции определяются квалификацией регулировщика. Изложим наши предложения по решению проблемы автоматизации процессов сборки и настройки манометрических приборов на основе структурной методологии IDEF [4]. Для автоматизации рассматриваемых процессов на данный момент собран стенд для автоматизированной настройки манометров, схема которого показана на *рис. 1*.

Схема на *рис. 1* аналогична схеме, приведенной в статье [2], но имеются отличия:

- Используются обычные видеокамеры, подключаемые к USB-порту компьютера. Это позволяет использовать произвольное количество видеокамер, ограниченное портами USB. При использовании параллельных процессов, частота обрабатываемых кадров остается 30 кадров в секунду.

- Устройство сопряжения (УС) выполняет прием цифрового сигнала от компьютера, преобразование его в аналоговый сигнал и усиление по мощности.

- В качестве датчика давления использован цифровой манометр, который подключается напрямую к компьютеру через СОМ-порт. Вычислительные функции по управлению клапанами переложены на компьютер, что упрощает конструкцию УС в отличии от устройства сопряжения и управления задвижками УСУЗ [2].

Структура программного обеспечения и его взаимодействие с внешними объектами реализована в двух вариантах. Эти варианты с использованием методологии DFD [4] представлены на *рис. 2 а, б*. Методология предполагает изображение скругленными блоками функций обработки информации, стрелками – информационных потоков, блоками с левым и верхним двойным бордюром – объекты, порождающие или потребляющие информацию, блоками с левым двойным бордюром – хранилища данных.

Рассмотрим подробнее работу каждого варианта разработанной информационной системы (ИС).

## 2.2. Первый вариант ИС (*рис. 2, а*)

Регулировщик вводит тип регулируемого манометра в память ЭВМ и запускает процесс съема характеристики. Блок «Управление» обеспечивает подъем давления до необходимого уровня, определяемого шкалой манометра, и спад до нуля. Параллельно с этим, блок «Определение угла стрелки» снимает характеристику настраиваемого манометра и записывает положение стрелки, соответствующие оцифрованным значениям давления, в таблицу «Давление-угол». После записи в таблицу всех значений запускается блок «Печать шкалы».

Блок «Управление» работает по следующему алгоритму:

- 1) На основе данных о типе манометра (класс точности, шкала) и значений давления на впускном клапане и на регулируемых манометрах, определяются максимально допустимая скорость роста давления.

- 2) По данным из таблицы «Время-давление» вычисляется текущая скорость роста давления и ускорение.

- 3) По данным о текущем состоянии гидравлической системы (давление, скорость роста давления) определяются управляющие сигналы.

Блок «Определение угла стрелки» действует по следующему алгоритму:

- 1) Решение о необходимости определения угла принимается на основе знания типа настраиваемого манометра и текущего давления. Если текущее значение давления находится в окрестности оцифрованного значению шкалы настраиваемого манометра, то выполняется п.2. Если давление «только что» вышло за пределы вышеуказанной окрестности, то выполняется п.3.

- 2) Определяется угол наклона стрелки с помощью алгоритма, описанного в статье [5]. Угол записывается в массив и если снята не вся характеристика прибора, то выполняется п.1.

С использованием метода наименьших квадратов (МНК) значения углов из массива аппроксимируются параболой и вычисляется угол при точно заданном давлении, соответствующем оцифрованному значению

шкалы. Найденный угол и давление записываются в таблицу «Давление-угол».

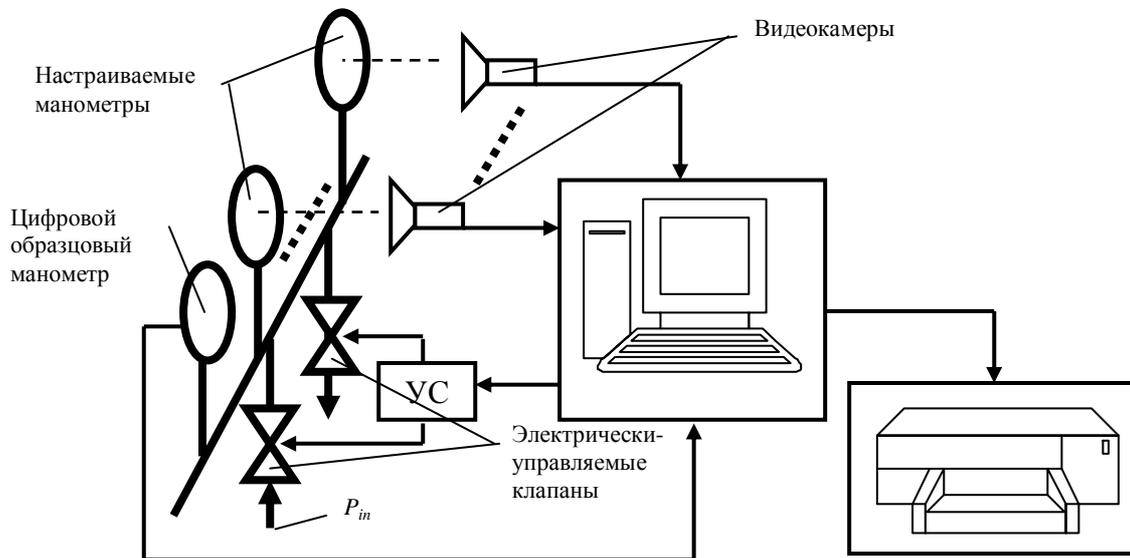


Рис. 1. Схема стенда для автоматизированной настройки манометров

Алгоритм формирования шкалы реализован следующим образом:

- 1) Осуществляется пересчет снятых углов таким образом, чтобы шкала была расположена симметрично относительно вертикальной оси циферблата.
- 2) Вычисляются координаты расположения цифр и выполняется их печать.
- 3) Печатаются оцифрованные риски.
- 4) При помощи линейной интерполяции вычисляются координаты промежуточных рисков и выполняется их печать.

### 2.3. Второй вариант ИС (рис. 2, б)

Основное отличие этого варианта от первого варианта состоит в том, что блоки измерения угла и измерения давления работают как отдельные, параллельные друг другу потоки.

Блок «Управление» аналогичен предыдущему, работает следующим образом:

- 1) На основе данных о типе манометра (класс точности, шкала) и значений давления на впускном клапане и на регулируемых манометрах, определяются максимально допустимая скорость роста давления.
- 2) По данным из таблицы «Время-давление» вычисляется текущая скорость роста давления и ускорение.
- 3) По данным о текущем состоянии гидравлической системы (давление, скорость роста давления) определяются управляющие сигналы.

Функция «Определение угла стрелки» отличается от предыдущего варианта пунктом 1 (угол измеряется на протяжении всего процесса регулировки) и пункт 3 перенесен в блок формирования шкалы:

- 1) Зная тип настраиваемого манометра и текущее давление, определяется примерная область поиска стрелки (сектор). Угол стрелки находится с помощью алгоритма, описанного в статье [5]. Если угол стрелки найден не удачно, то стрелка ищется на всем кадре.
- 2) Найденный угол вместе с меткой времени записывается в массив (таблица «Время-Угол») и если давление не превысило номинального давления регулируемого манометра, то выполняется п.1.

Алгоритм формирования шкалы запускается после завершения цикла управления давлением. Отличается от предыдущего варианта тем, что сначала строится характеристика регулируемого манометра по двум графикам «Время-Давление» и «Время-Угол». Алгоритм реализован следующим образом:

- 1) По таблицам «Время-угол» и «Время-давление» вычисляется характеристика «Давление-угол».
- 2) Экспериментальная характеристика «Давление-угол» аппроксимируется с помощью МНК полиномом 2-й степени в окрестности каждой оцифрованной точки шкалы давления и вычисляется угол при точно заданном давлении. Найденные углы записываются в таблицу «Шкала».

3) По команде пользователя выполняются следующие действия: снятые углы из таблицы «Шкала» пересчитываются таким образом, чтобы шкала была расположена симметрично относительно вертикальной оси циферблата.

4) Вычисляются координаты расположения цифр и печатаются.

5) Печатаются оцифрованные риски.

6) Вычисляются координаты промежуточных рисок, при помощи линейной интерполяции, и печатаются.

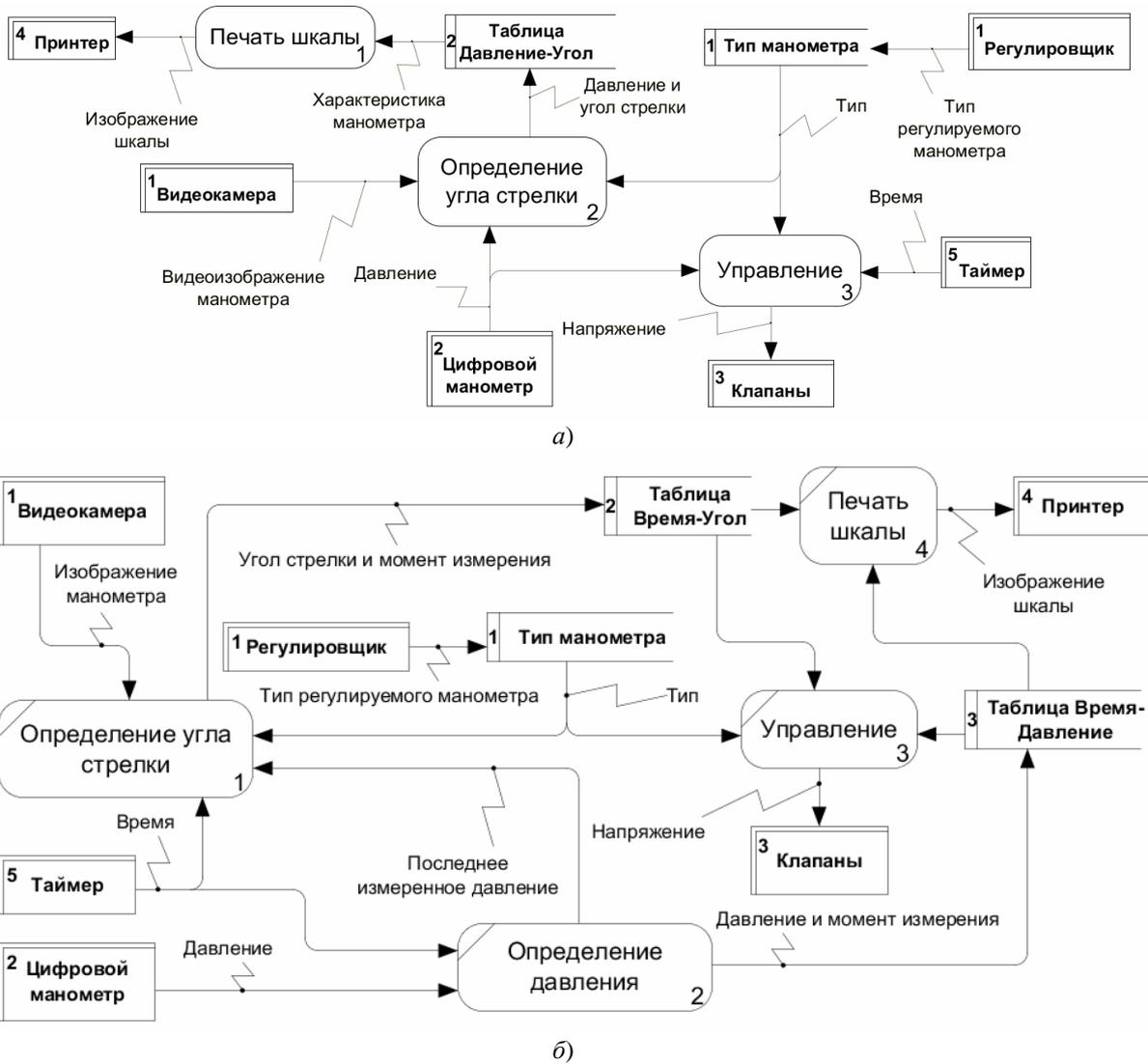


Рис. 2. Структура информационных потоков в системе.

## 2.4. Модель автоматизированной регулировки манометров

Рассмотрим процесс автоматизированной настройки манометров с точки зрения оператора-регулировщика и инженера АСУ ТП. Цель анализа: выделить автоматизируемые действия настройки манометров, выявить достоинства и недостатки такого процесса перед механизированным процессом.

На рис. 3, 4 изображены функциональные структуры автоматизированного процесса.

Отличие схемы на рис. 3 от схемы традиционного механизированного процесса настройки манометров (рис. 2 в [6]) состоит в следующем:

- Упрощается частичная сборка, достаточно установить только стрелку на узел, причем произвольно в левый нижний квадрант, но сам узел необходимо точно ориентировать по видеокамере.

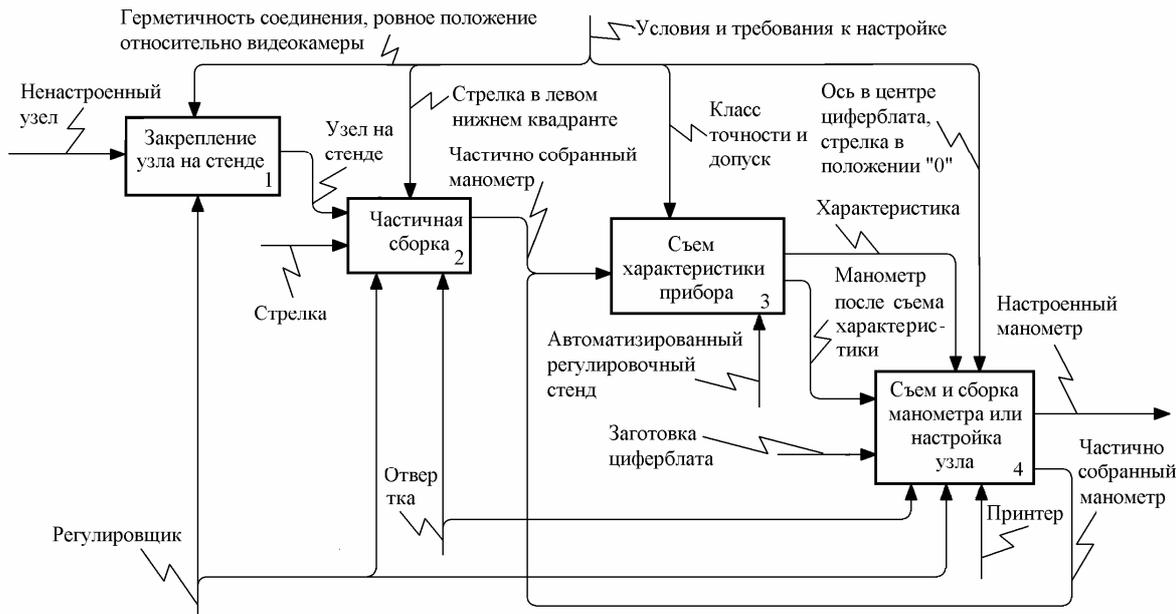


Рис. 3. Функциональная схема настройки манометра «как должно быть».

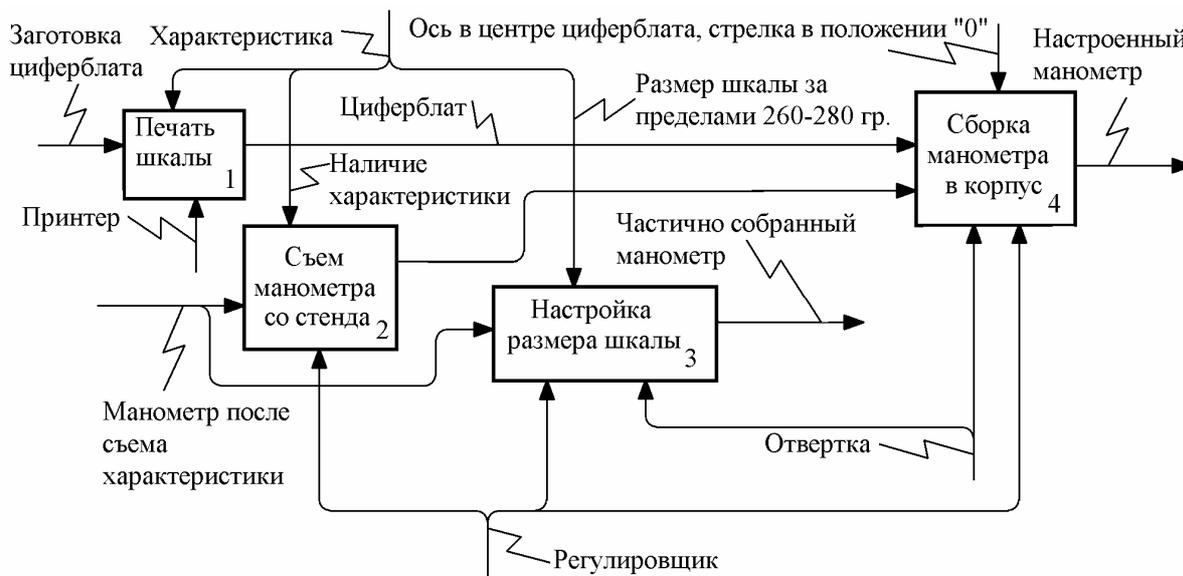


Рис. 4. Функциональная схема сборки манометра «как должно быть».

• Вместо определения погрешностей появляется блок «съем характеристики», который запускается регулировщиком, но выполняется полностью автоматически.

• Отсутствует процесс разборки перед настройкой узла заменяется процессом распечатки шкалы, который запускается регулировщиком, но выполняется автоматически. Итерация не требует операций сборки/разборки манометра и будет выполняться только для тех узлов, у которых размер шкалы оказался за пределами 260° - 280°. На производстве такие ситуации бывают крайне редко, поэтому на уменьшении

производительности это практически не скажется.

• Все действия являются простыми и требуют знания основ работы с компьютерной техникой.

На рис. 5 представлена последовательность действий в автоматизированном процессе настройки манометров.

После установки узлов на стенд, стрелок на них и запуска процесса настройки, регулировщик заряжает заготовки циферблатов в принтер и собирает манометры, шкалы для которых были распечатаны на предыдущем цикле настройки. После завершения съема

характеристик запускается процесс печати шкал для тех узлов, размеры шкал которых лежат в заданных пределах. После завершения процессов № 2 и № 3 регулировщик снимает со стенда узлы, для которых распечатаны шкалы.

Как видно из диаграммы (рис. 5), автоматизация некоторых действий позволяет распараллелить процесс настройки манометров.

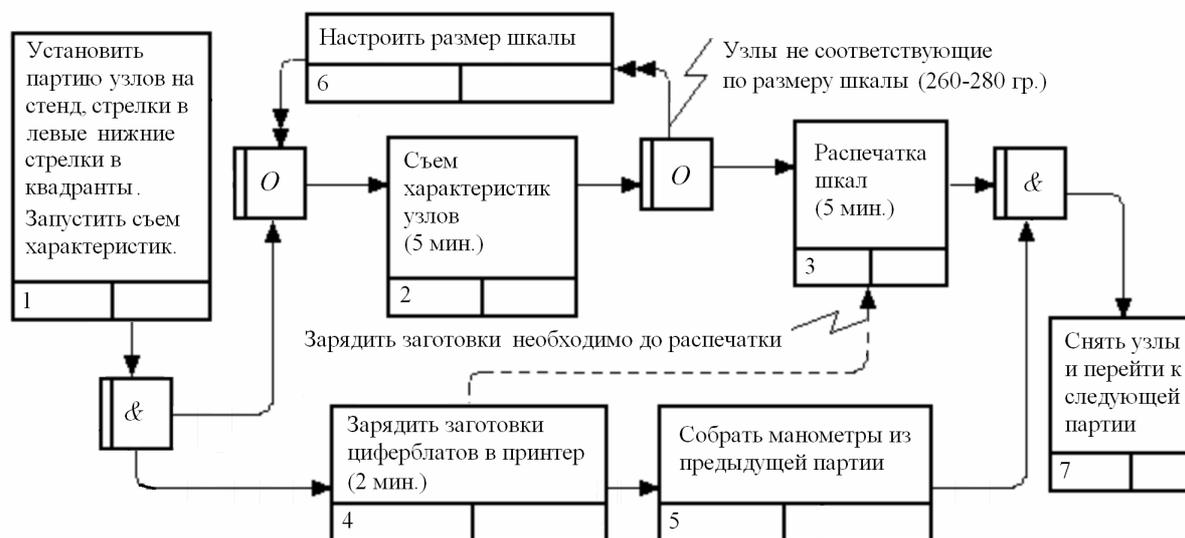


Рис.5. Последовательность действий в автоматизированном процессе.

Автоматизированный процесс регулировки представляется следующими действиями.

Перед началом работы регулировщик задает тип используемого оборудования (видеокамера, принтер). При регулировке: устанавливает на стенд регулируемый узел со стрелкой в произвольном положении. Положение стрелки должно примерно соответствовать начальному положению. Вводит тип узла в программу регулировки и запускает программу. После завершения программы регулировщик распечатывает циферблат и устанавливает его на узел.

Предложена техническая реализация всех этапов для автоматизации процесса индивидуальной градуировки манометров: стенд для автоматизации настройки манометров, устройство сопряжения компьютера с клапанами, система управления давлением, датчик угла наклона стрелки [5], программа печати шкалы. На данный момент реализована система управления, способная примерно за 2,5 минут повысить давление до 25 кгс/см<sup>2</sup> (при давлении на входе повышающего клапана 28 кгс/см<sup>2</sup> и на выходе понижающего примерно 0). Расчетное увеличение производительности при использовании данного стенда 20%. Реализация автоматизированной системы сборки и настройки манометрических приборов базируется на патенте [3], полученном с участием автора данного доклада. Организованный таким образом процесс

настройки имеет перспективы дальнейшего увеличения производительности за счет использования более современной техники и совершенствования процессов управления.

## 2.5. Структура автоматизированного регулировочного стенда

Структура автоматизированного стенда, приведенная на рис. 1 содержит устройство сопряжения (УС), которое состоит из двух основных блоков: цифроаналоговый преобразователь (ЦАП) и усилитель мощности. Возможна различная реализация УС. Один из вариантов УС представлен на рис. 6. В качестве ЦАП использован контроллер OWEN ПЛК 150, а в качестве усилителя – модуль ВМ-037.

Рассмотрим работу схемы, изображенной на рис. 6. Датчик давления (ДМ5002) передает значение давления в цифровом виде по интерфейсу RS232 через USS-111 (или другой преобразователь RS232-USB) на ЭВМ. На основе собранных данных о росте давления, информационная система решает, как изменить управляющие сигналы, и выдает цифровое значение на контроллер через АС4 (или другой преобразователь USB-RS485). Контроллер преобразует цифровые значения сигналов управления в аналоговые сигналы (АО1, АО2). Аналоговые сигналы с контроллера проходят на усилитель мощности (блок EPA M3220 или модуль ВМ-037), далее, через контакты реле DO1 и DO2 на катушки клапанов. Если

цифровое значение какого-либо управляющего сигнала достаточно мало, то контроллер размыкает контакты соответствующего реле (DO1, DO2), в результате на катушках

оказывается нулевое напряжение.

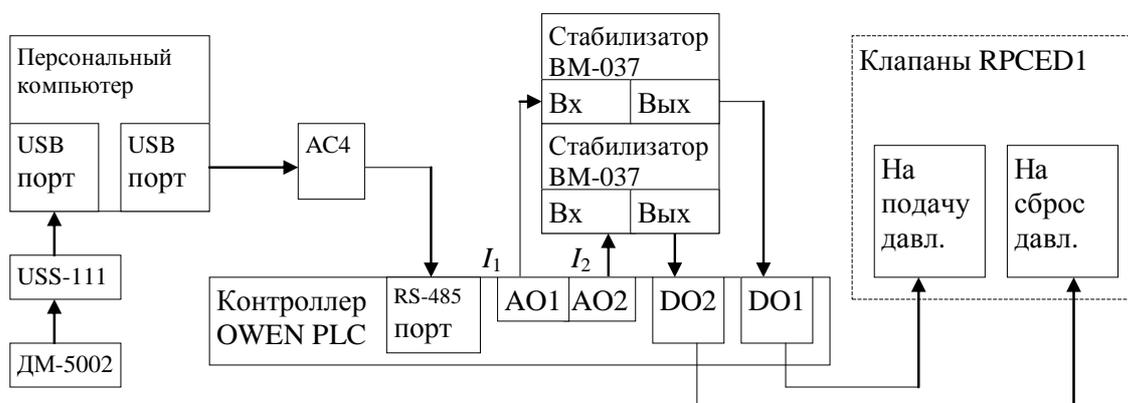


Рис. 6. Схема УС с использованием ВМ-037

Итак, на основе моделирования процессов регулировки манометров для автоматизации этих процессов решены следующие задачи:

- Проанализированы информационные потоки, реализованы два варианта информационных структур (рис. 2).
- Проанализированы последовательности действий (рис. 3–5).
- Спроектированы устройства сопряжения (один из вариантов с использованием модулей ВМ-037 представлен на рис. 6).

### III. МОДЕЛИ МЕХАНИЗМОВ И УСТРОЙСТВ ГРАДУИРОВОЧНОГО СТЕНДА

Важнейшей компонентой стенда для автоматизированной регулировки узлов манометров с трубкой Бурдона является гидравлическая установка (задатчик давления (ЗД)). Эта установка предназначена для плавной (равномерной) подачи и сброса давления на регулируемые манометры. В математическом

описании процессов, протекающих в ЗД, обнаруживаются нелинейности, не позволяющие применить теорию линейных дифференциальных уравнений для аналитического исследования моделируемых процессов [7]. В данной статье приведена схема гидравлической установки стенда, на котором проводились описываемые ниже эксперименты.

На рис. 7 представлены результаты экспериментов: изменение давления от времени при постоянных значениях токов контроллера, которые обозначены через  $I_1$ ,  $I_2$  на рис. 6. На рис. 7 а представлены графики роста давления при входном давлении  $P_{in} = 30 \text{ кг/см}^2$  (см. рис. 1), на рис. 7 б показаны графики роста давления при  $P_{in} = 51 \text{ кг/см}^2$ . Графики на рис. 7 б сняты при одинаковых управляющих воздействиях, отличие этих графиков друг от друга и отсутствие установившегося значения на всех графиках рис. 7 а, б свидетельствует о том, что система является нестационарной.

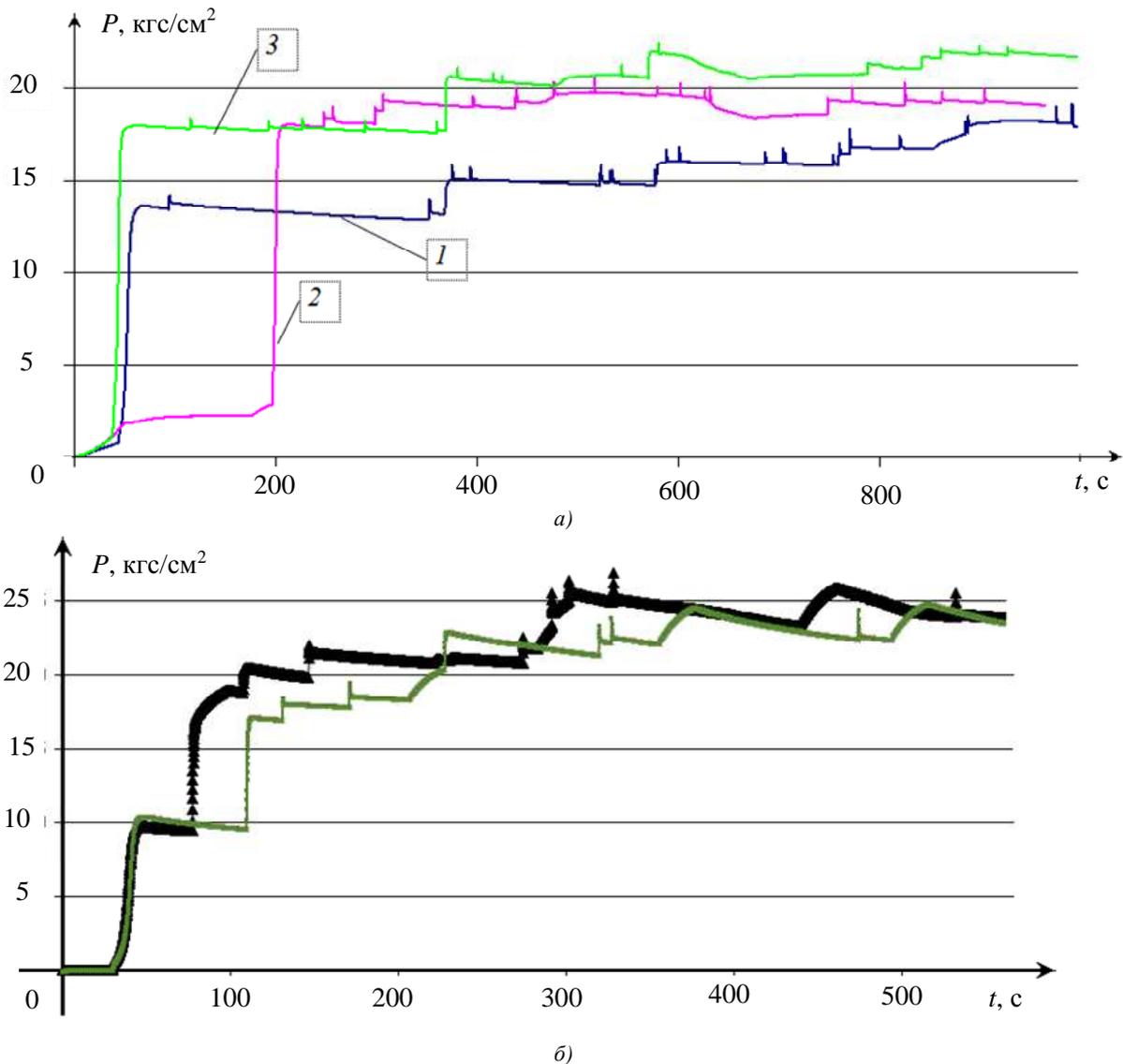


Рис. 7. Рост давления от времени: а) при  $P_m=30 \text{ кгс/см}^2$ ,  $I_1=4 \text{ мА}$ : 1 –  $I_2=20 \text{ мА}$ , 2 –  $I_2=18 \text{ мА}$ , 3 –  $I_2=16 \text{ мА}$   
 б) оба графика сняты при параметрах:  $P_m=51 \text{ кгс/см}^2$ ,  $I_1=12 \text{ мА}$ ,  $I_2=20 \text{ мА}$

Для настройки манометров необходимо сначала плавно повышать давление до максимального значения, а затем его плавно снижать до минимального значения. Графики изменения давления и его скорости представлены на рис. 8 а, б. Однако на начальном этапе настройки невозможно добиться требуемого изменения скорости из-за ограничений по выходному сигналу устройства сопряжения (УС), поэтому следует использовать график, представленный на рис. 8 в. В данном процессе допускается снижение скорости роста давления, но не желательно превышение его скорости выше определенного максимума, следовательно, график роста давления может иметь вид, показанный на рис. 8 г.

При проведении опытов было замечено «проседание» характеристики манометра на малых давлениях и при большой скорости роста

давления (возможно, что этот эффект является следствием инерционности механизма), поэтому максимально допустимая скорость роста на малых давлениях должна быть ниже обычного (рис. 8 д, е).

При исследовании программы управления, которая успешно отработывала рост давления (рис. 9 а), через несколько циклов роста-спада давления начинали проявляться эффекты «залипания» (рис. 9 б). Эти эффекты могут быть обусловлены: либо наличием сухого трения, либо гидравлической силой потока масла, либо наличием в масле мелких частиц, которые забивают клапан и препятствуют потоку масла и, следовательно, успешному управлению давлением.

В результате проведенного исследования, результаты которого частично опубликованы в [7], определена возможность плавного

(равномерного) управления давлением технической системы (ТС) для регулировки манометра в заданном диапазоне давлений, но и обоснованы рекомендации по синтезу

алгоритмов управления ТС подачи давления и автоматизации процессов регулировки узлов манометров.

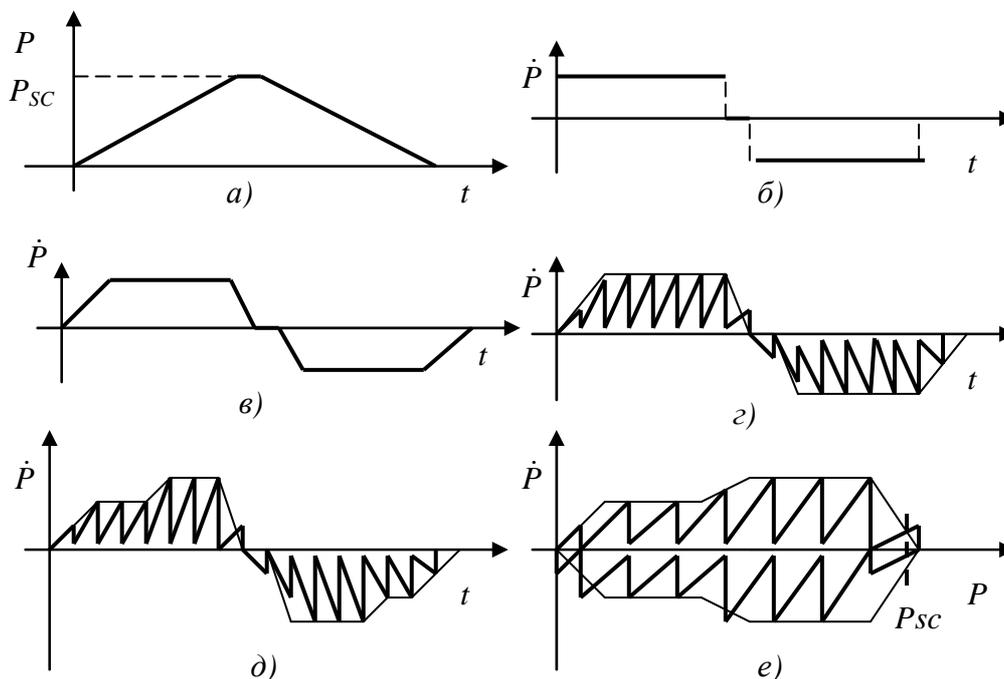


Рис. 8. Требования к поведению системы

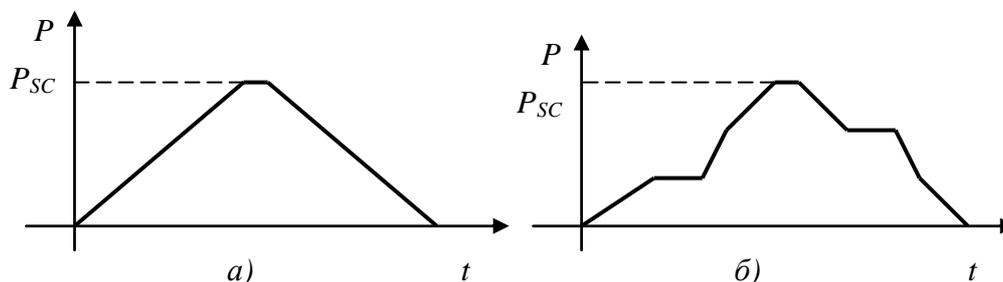


Рис. 9. Эффекты «залипания» при управлении давлением

В данных алгоритмах управления используется оптическая связь при настройке и градуировке манометрических приборов и используются алгоритмы определения состояния манометра по изображению его шкалы на видеокадре [5].

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение структурной методологии IDEF и методов теории управления к задачам автоматизации технологических процессов (ТП) настройки и градуировки манометрических приборов обеспечивает их эффективное решение. Однако при управлении подобными ТП необходимо учитывать их нелинейные свойства, их нестационарность, неполноту

априорной информации о моделях ТП, их функционирование в условиях помех и возмущений (см. рис. 7). Следует также учитывать человеческий фактор. В решении данной конкретной научно-технической проблем отметим следующие перспективные направления.

##### 4.1. Распараллеливание процессов

Информация об управляемом ТП поступает с видеокамер [3,5]. Разработанную программу автоматизации можно модернизировать и использовать большее количество видеокамер. В настоящее время проведены эксперименты по увеличению числа видеокамер до восьми. При решении данной задачи возникают сложности

технического характера: исполнение стенда, увеличение его габаритов; увеличение количества портов USB, увеличение их пропускной и нагрузочной способности; увеличение вычислительной мощности используемого компьютера. При этом увеличивается количество одновременно градуируемых манометрических приборов, что обуславливает увеличение степени распараллеливания процессов съема информации о состоянии приборов и их градуировки.

Представляет интерес использование при разработке стенда электромагнитных энкодеров в качестве датчиков угла стрелки манометров (вместо видеокамер).

Отметим следующие достоинства энкодеров перед видеокамерами:

- Время измерения составляет примерно 1 мс, вместо 33 мс (время получения видеокadra).
- Точность, которую обещает производитель энкодеров, составляет примерно  $0,09^\circ$  (разрешение 12 бит).
- Небольшая вычислительная мощность, необходимая, для обработки компьютером сигнала от энкодера.

• Низкая нагрузка канала передачи данных. Энкодеру достаточно передать в компьютер одно число, оформленное в протокол, что составляет единицы байт, видеокамера должна передать в компьютер видеокادر, что составляет килобайты данных.

Использование энкодеров позволит значительно увеличить количество датчиков для получения информации об управляемом ТП.

Следует отметить также недостаток: необходимость точной установки энкодера относительно регулируемого узла и его тесное взаимодействие с технологической стрелкой узла (энкодер необходимо устанавливать на расстоянии нескольких мм от магнитной стрелки узла, видеокамера располагается на расстоянии нескольких см от технологической стрелки узла).

#### **4.2. Модернизация технической системы подачи давления для регулировки манометров**

В проблеме автоматизации регулировки узлов манометров «узким» местом остается задача автоматического управления давлением на стендовых манометрах. Идентификация этой технической системы подачи давления выявила ее нелинейность, нестационарность, высокий уровень помех и возмущений. Возникло предложение по модернизации задатчика давления, т.е. вместо электромагнитных клапанов и проточной схемы подачи давления использовать пресс, управляемый шаговым двигателем. Из сравнительного анализа данных устройств следует, что с модернизированным

задатчиком процесс управления давлением будет удовлетворять заданным требованиям по устойчивости и точности, следовательно, появится возможность увеличить скорость и точность съема характеристик, повысить производительность стенда. Преимуществом модернизированного задатчика давления является низкий расход масла для задания средних давлений (не требуется гидроусилитель), за счет отсутствия проточного режима работы при подаче давления. Недостатком такого задатчика являются большие габариты (вместо двух клапанов используются пресс и шаговый двигатель, а в некоторых случаях потребуется гидроусилитель и редуктор).

#### **4.3. Роботизация**

Дальнейшее увеличение объема информации об управляемом ТП, т.е. увеличение количества датчиков приведет к дополнительной нагрузке оператора. Он будет долго устанавливать регулируемые манометры на стенд и задерживать процесс съема характеристики, поэтому следующим шагом совершенствования стенда должна быть роботизация: использование манипуляторов для установки узлов на регулировочный стенд; разложение заготовок на планшет для печати и разложение отпечатанных циферблатов на манометры.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

- [1] Свинолулов Ю.Г., Кузнецов А.А. Результаты разработки и внедрения в производство новой технологии автоматизированной регулировки стрелочных манометров. Достижения науки – производству. Сб. статей под ред. А.А. Светлакова, Ю.Г. Свинолулова. Томск: Изд – во ТГУ, 2003. С. 16 – 62.
- [2] Лазичев А.А., Самулева Ю.А. Система автоматизированной настройки манометров с помощью нанесения шкал // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. №8. – С. 35–38.
- [3] Способ индивидуальной градуировки шкал манометров и устройство для его осуществления // А.Ю. Гетц, В.И. Мачкинис, С.М. Везнер, А.Ю. Метальников, С.М. Алферов, А.Г. Царенко // Патент РФ на изобретение № 2428668, зарегистрировано в Государственном реестре РФ 10.09.2011
- [4] Теория информационных процессов и систем: учебник для студ. вузов / Под ред. Б.Я. Советова. М.: Изд. Центр «Академия», 2010. 432 с
- [5] Алфёров С.М. Измерение угла границы объекта на видеокadre низкого разрешения с использованием априорной информацией // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2011. № 1(23). С. 168–170.
- [6] Алфёров С.М., Кориков А.М. Автоматизация процессов сборки и настройки манометров // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и

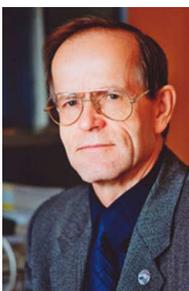
радиоэлектроники. 2011. № 2(24), часть 3. С. 121–128.

- [7] Алфёров С.М. Корилов А.М. Моделирование датчика давления для настройки манометров // Докл. Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2012. № 2(26), часть 1. С. 193–198.



**Сергей Алфёров** – ассистент кафедры автоматизированных систем управления в ТУСУР. Область научных интересов и компетенций: автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 10 научных публикаций.

E-mail: [alhoesm@sibmail.com](mailto:alhoesm@sibmail.com)



**Анатолий Корилов** – зав. кафедрой автоматизированных систем управления в ТУСУР, профессор НИ ТПУ. Область научных интересов и компетенций: автоматизация и оптимизация систем обработки информации и управления. Имеет более 300 научных публикаций, в том числе 10 монографий

E-mail: [korikov@asu.tusur.ru](mailto:korikov@asu.tusur.ru)

## Automatization of Process of Calibration of Manometers Scales

S.M. ALFEROV, A.M. KORIKOV

*Abstract:* The systematic analysis of technology processes for assembling and calibrating of manometers has been accomplished, advantages of the existing technological process are determined. Authors proposed the realization of the stages of autoimmunization of the processes of individual calibration of manometers, which are the following: automated test bench, connecting device for computer and valves, pressure controlling system, sensor of angle of pointing needle, program for scale printing. The main component of automated system for manometers calibration is hydraulic plant setting the pressure, which is used for the uniform rising and lowering of pressure to the calibrated manometers. When the processes in pressure setting device are simulated, the non-linear dependence are become apparent, which makes it difficult the researching and calibration processes. The paper discusses some variants of linearization of calibration processes. The recommendations for the design of algorithms for controlling system and robotic realization of technology processes are based.

*Key words:* Control, automation, modeling, manometers, calibration.

**V. Популярные статьи.  
Введение в специальность.**

## Содержание раздела:

- В.Г. Трубин, В. Ескин, А.Л. Печников, В.А. Жмудь. Использование сети интернет для интерактивной лабораторной работы с дистанционным управлением моделью робота снегоуборщика. (НГТУ, Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. 1(7). С. 95–103.
- В.А. Жмудь. Прецизионные измерения частоты для аттестации частотных стандартов. (Новосибирск, НГТУ, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. 1(7). С. 104–119.
- Н.Р.Рахимов. Что такое АФН-эффект. (НГТУ, Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2014. 1(7). С. 120–124.

# Использование сети интернет для интерактивной лабораторной работы с дистанционным управлением моделью работа снегоборщника

В.Г. Трубин, А.В. Ескин, А.Л. Печников, В.А. Жмудь  
НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В данной статье описана программно-аппаратная часть и даны методические указания к лабораторной работе для студентов по программе двойных дипломов, реализуемой в рамках проекта TEMPUS-MPAM, а также для студентов пятого курса направления подготовки 220400.68 Управление в технических системах, магистерская программа «Комплексные системы автоматизации». Целью работы является изучение механизма удалённого управления моделью робота по XMPP протоколу с визуальным контролем при помощи программного обеспечения Skype.

**Ключевые слова:** Мехатроника, автоматика, дистанционное управление, робототехника, высшее техническое образование, программа двойных дипломов

## ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное управление роботами актуально вследствие необходимости решения многих технических задач.

Управление может быть осуществлено разными способами. Простейший способ состоит в управлении извне с участием оператора. Недостатки этого способа кроются в невозможности оперативного решения задач, в зависимости быстродействия от дистанции и пропускных способностей приемо-передающего тракта, ограниченности информации для принятия решений. Другой способ состоит в решении задач управления непосредственно роботом. Недостаток этого способа состоит в недостаточности интеллектуальных способностей вследствие отсутствия эффективных алгоритмов принятия решений, алгоритмов распознавания данных и (или) интеллектуальной или вычислительной мощности вычислительных устройств.

В связи с этим на кафедре Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете уделяется большое внимание обновлению учебных курсов, связанных мехатроникой, робототехникой и автоматикой на основе собственных разработок и

приобретаемых программно-аппаратных средств и учебных стендов. Наряду с использованием таких широко известных программных средств, как LabView, MATLAB, MathCAD в последнее время стали широко применяться программы VisSim, MultiSim, PSpice.

Можно выделить следующие предложенные на кафедре Автоматики методики:

1. Модификация стоимостной функции для ограничения области поиска коэффициентов регулятора путем введения в нее слагаемого, зависящего от произведения коэффициентов.
2. Модификация стоимостной функции для предотвращения перерегулирования путем введения в нее слагаемого, резко возрастающего при перерегулировании, или слагаемого, резко возрастающего при положительном произведении ошибки на ее производную;
3. Модификация стоимостной функции для обеспечения энергосбережения путем внесения в нее слагаемого, резко возрастающего при больших энергетических затратах на управление.
4. Обеспечение корректности моделирования путем разработки ряда требований к шагу моделирования, выбору метода интегрирования, запрета на включение в контур нереализуемых динамических звеньев и т. д.
5. Обеспечение робастности путем моделирования ансамбля систем с одинаковыми регуляторами и варьируемыми параметрами объекта;
6. Обеспечение работоспособности метода при недостаточно точно определенной высокочастотной модели объекта;
7. Одновременное обеспечение высокой динамической и статической точности при управлении объектами, склонными к колебаниям, путем использования плавно переключающихся регуляторов;
8. Обеспечение методов адаптивного управления с использованием тестовой девиации коэффициентов усиления при

введении в стоимостную функцию зоны нечувствительности;

9. Обоснование и апробация новых структур регуляторов для одноканальных и многоканальных объектов.

Многие из предложенных технических решений запатентованы.

С целью развития систем мехатроники и робототехники на кафедре Автоматики выполнены следующие экспериментальные исследования:

1. Разработаны две действующие модели роботов – снегоборщиков, представляющих собой беспилотное самодвижущее средство, управляемое встроенным алгоритмом с обнаружением препятствия. Две версии управление, беспроводное и проводное, были изготовлены. На базе данных устройств разработаны лабораторные работы, которые могут проводиться дистанционно через сеть Интернет.

2. Успешно реализуется международная программа двойных магистерских дипломов с университетами Чехии и Болгарии. В настоящее время два магистра от кафедры Автоматики направлены в рамках программы TEMPUS-MRAM для обучения в Чешском университете (г. Люберец), по окончании обучения они защитят дипломные работы, получают дипломы Чешского университета, вернутся на кафедру, защитят дипломные проекты и получают дипломы НГТУ, в полном соответствии с программой. Программа реализуется при поддержке Евросоюза на основании гранта. Данная программа не предусматривает финансирования научных исследований. Она поддерживает международный обмен студентами.

На этой основе специалисты кафедры рекомендуют применение беспилотных средств, управляемых в двух уровнях, причем нижний уровень управления базируется на встроенном компьютерном интеллекте для принятия элементарных решений, а верхний уровень управления реализуется централизованно с участием человека.

В этой связи актуально обучение студентов в этом направлении. На этом основании разработана, в частности, описываемая ниже лабораторная работа, которая позволяет управлять действующей моделью беспилотного робота-снегоборщика. При этом часть задач ставится операторов через сеть Интернет (например, принятие решения о направлении движением – вперед, назад, влево, вправо или остановка). Дрейгая часть задач решается непосредственно встроенным интеллектом, то есть микропроцессором, расположенным в роботе и управляющим его ходовой частью.

В рассматриваемой работе используются следующие термины: XMPP, Python, Bluetooth. Перед выполнением данной работы настоятельно рекомендуется ознакомиться с

этимися понятиями изучив материал источников [1] (XMPP), [2] (Python) и [3] (Bluetooth).

## 1. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ

Данная работа использует принцип удаленного доступ к реальному подвижному объекту (модели робота снегоборщика), организую тем самым виртуальную лабораторию, которая может быть использована в образовательных целях. В данном случае виртуальная лаборатория представляет собой систему взаимосвязанных между собой программ и управляемых электронных устройств.

Эта система состоит из следующих составных частей:

1. Клиентский персональный компьютер с развернутым на нём ПО для удаленного управления моделью робота;

2. Клиентский SMPP сервер находящейся в сети Интернет и получающий запросы от клиентского персонального компьютера;

3. Серверный SMPP сервер находящейся в сети Интернет и получающий поток данных от клиентского SMPP сервера;

4. Серверный компьютер, с развернутым на нём ПО, которое транслирует запросы из сети интернет от SMPP сервера в управляющие команды для модели робота;

5. Bluetooth адаптеров на стороне серверного компьютера и на стороне подвижной модели робота, организующих беспроводной канал обмена данными;

6. Модели робота снегоборщика (подвижная платформа на базе конструктора Lego Mindstorm NXT2.0 [4]).

Основным объектом изучения данных методических указаний является модель робота, (изображена на *рис. 1*), которая представляет собой подвижную механическую платформу, выполненную из деталей конструктора Lego Mindstorm NXT 2.0. На ней размещается электронная часть, управляемая по алгоритму программы микроконтроллера.

Модель построена по модульному принципу. Каждой функции устройства, соответствует определенный программно-аппаратный модуль, который может использоваться как отдельно от устройства, так и в его составе. Конструктивно модули компонуются на одну печатную плату. В программе микроконтроллера они представлены отдельным классом на языке C++.

Микроконтроллер, так же как и другие модули, выполнен на отдельной печатной плате. В качестве нее используется отладочная плата STM32VLDISCOVERY [5]. Она обладает минимально необходимым набором элементов для организации управления другими модулями модели робота.

Основными устройствами, обеспечивающими передвижение модели в пространстве, служат два электродвигателя

постоянного тока из набора Lego Mindstorm NXT 2.0, которые управляются парой микросхем ВА6219В. В электродвигатели встроены квадратурные энкодеры, сигналы которых используются для определения частоты вращения вала электродвигателя и его текущего углового положения. Более подробную информацию об этом модуле можно почерпнуть в [6].

Для управления подвижным роботом целесообразно использовать беспроводный

режим доступа к нему. Эта задача решена применением Bluetooth адаптера HC-05, который преобразует поток данных, довольно сложного беспроводного протокола передачи данных Bluetooth в простой проводной последовательный интерфейс RS232. Сам адаптер выполнен на миниатюрной плате (внешний вид представлен на рис. 2), которая вместе с линейным преобразователем напряжения и другими компонентами монтируются на плате модуля.

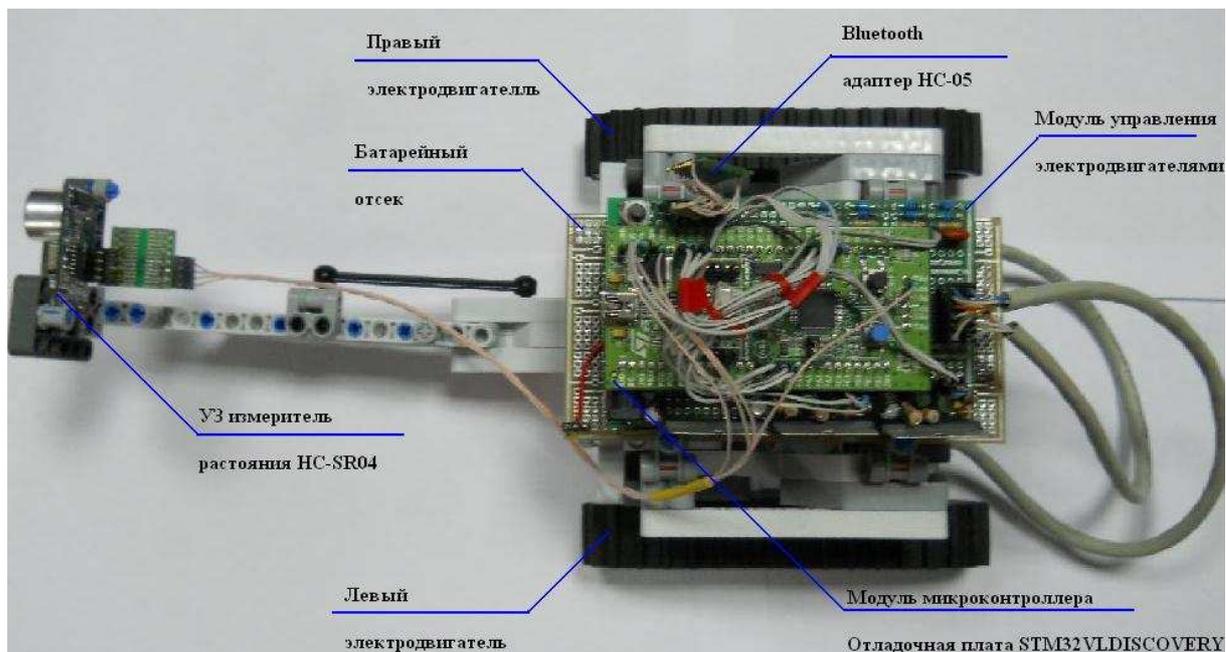


Рис. 1. Внешний вид модели робота

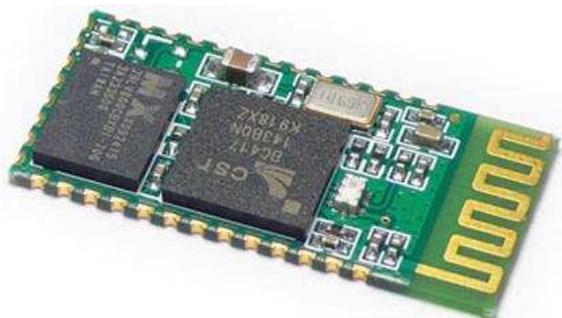


Рис. 2. Внешний вид Bluetooth адаптера HC-05

Основная задача данного модуля состоит в приеме управляющих команд из сети Bluetooth, декодировании и передаче их другим модулям для выполнения. Примером здесь может служить управление электродвигателями изучаемое в данной лабораторной работе. Более подробную информацию об этом модуле можно почерпнуть в [7], [8].

Помимо уже описанных модулей в системе заложен потенциал по её дальнейшему наращиванию. Таким примером может служить ещё один модуль, который обеспечивает ориентацию в пространстве модели робота. Им является ультразвуковой измеритель расстояния

HC-SR04. Хотя этот модуль не включен в рассмотрение данной работы, но он может быть изучен самостоятельно.

Питание всех модулей модели робота организуется от 6 аккумуляторных батарей (LiMH) размера AA LR6, которые аналогичным образом реализованы в виде аппаратного модуля.

## 2. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 2.1 Общие положения

Данная лабораторная работа построена по принципу виртуальной лаборатории, то есть доступ к реальному оборудованию организуется удаленно, в том числе при помощи сети Интернет. В данной работе студент или экспериментатор самостоятельно производит удалённое подключение к модели робота (реальному физическому объекту) и производит манипуляции его органами управления так, как если бы он находился в обычной лаборатории.

Объем материала изучаемого в работе не ограничивается действиями в виртуальной лаборатории. Также оставляется задел для проведения реальных занятий в лаборатории, но

с упором на серверную часть системы (в отличие от виртуальной лаборатории, где исследуется клиентская часть), что предоставляет определенную гибкость в её выполнении.

Работа рассчитана на использование компьютеров (клиентской и серверной частей) под управлением 32 разрядной операционной системы Windows XP с действующим интернет соединением.

Разворачивание программного обеспечения на клиентском компьютере (виртуальная лаборатория).

Чтобы организовать работу клиентского компьютера пользователю потребуется:

1. Интерпретатор языка Python
2. Модуль PyWin32 для доступа к функционалу WinAPI операционной системы Windows на языке Python;
3. Модуль xmppru для связи по протоколу XMPP с клиентским сервером на языке Python;
4. Модуль pydns для определения программами на языке Python IP адресов в интернете по доменному имени (в данном случае определение IP адреса аккаунта на сервере XMPP).

Кроме этого на компьютере должен иметься файл «EdpCtrlClient\_v005.py», на языке Python. Также необходимо создать свой собственный аккаунт на одном из публичных XMPP серверов. Дополнительно потребуется файл «auth-1305.py».

Все перечисленные устанавливаемые программы можно загрузить из сети интернет или получить в свободном доступе. При самостоятельной загрузке файлов необходимо учесть следующие моменты:

1. Интерпретатор языка Python должен быть версии 2.6 (версия языка) и ни какой другой (название файла - «python-2.6.6.msi»);
2. Модуль PyWin32 должен быть рассчитан на версию языка 2.6 (пример названия файла - «pywin32-218.win32-py2.6.exe»);
3. Модуль xmppru следует выбрать версии xmppru-0.4.0.win32.exe и дополнительно к нему загрузить файл «xmppru-0.5.0rc1-py2.6.egg»;
4. Модуль pydns необходимо выбрать в виде архива tar версии 2.3.6 — файл «pydns-2.3.6.tar.gz».

## 2.2. Рекомендуемый порядок действий

Установите интерпретатор языка Python и затем модуль PyWin32. Процесс установки этих компонентов достаточно прост следует лишь следовать предлагаемым инструкциям мастера установки.

Установите модуль xmppru выполнив следующие пункты:

Установите модуль xmpp, запустив файл xmppru-0.4.0.win32.exe. В ходе установки могут возникнуть ошибки, что не является критическим и можно на них не обращать внимание.

Удалите все файлы из C:\Python26\Lib\site-packages\xmpp (при условии установки интерпретатора Python в папку по умолчанию).

Переименуйте расширение у файла xmppru-0.5.0rc1-py2.6.egg с «egg» на «zip».

Из xmppru-0.5.0rc1-py2.6.zip\xmpp (потребуется программа-архиватор) скопировать все файлы в C:\Python26\Lib\site-packages\xmpp.

Удалите файлы auth.py и auth.pyc в каталоге C:\Python26\Lib\site-packages\xmpp.

Скопируйте в C:\Python26\Lib\site-packages\xmpp файл auth-1305.py (можно взять у преподавателя) и переименуйте его в auth.py.

Произведите поэтапно установку модуля pydns согласно списка ниже.

Разархивируйте имеющейся архив «pydns-2.3.6.tar» для этого потребуется два раза произвести распаковку файлов, может подойти любой архиватор, в частности бесплатный — «7-zip» [9]. Получится папка с файлами «pydns-2.3.6».

Запустите командную строку Windows и при помощи команды «cd <путь к папке pydns-2.3.6>» перейти в папку с разархивированными файлами.

Убедитесь, что в строке приглашения консоли установлен правильный путь к папке «pydns-2.3.6».

Введите команду «C:\Python26\python.exe setup.py install». В случае успеха должно получиться как на рис. 3.

Найдите и изучите в интернете перечень всех доступных, на данный момент, мест создания аккаунта для обмена мгновенными сообщениями по протоколу XMPP. Создайте свой аккаунт на выбранном Вами произвольном XMPP-сервере.

```

C:\FreeCommander - DOS
Microsoft Windows XP [Версия 5.1.2600]
(C) Корпорация Майкрософт, 1985-2001.

F:\Remote Control Jabber\Soft\Installers\pydns-2.3.6>C:\Python26\python setup.py
install
install
running install
running build
running build_py
running install_lib
writing byte-compilation script 'c:\docume~1\user\locals~1\temp\tmpnt8wln.py'
C:\Python26\python.exe -O c:\docume~1\user\locals~1\temp\tmpnt8wln.py
removing c:\docume~1\user\locals~1\temp\tmpnt8wln.py
running install_egg_info
Removing C:\Python26\Lib\site-packages\pydns-2.3.6-py2.6.egg-info
Writing C:\Python26\Lib\site-packages\pydns-2.3.6-py2.6.egg-info

F:\Remote Control Jabber\Soft\Installers\pydns-2.3.6>_

```

Рис. 3. Установка pydns-2.3.6 на компьютер

### 3. ТЕСТИРОВАНИЕ РАБОТЫ КЛИЕНТСКОГО КОМПЬЮТЕРА (ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ)

Перед дальнейшими действиями необходимо убедиться, что серверная часть системы (серверная программа) запущена и произведены все необходимые действия по её настройке. Затем следует совершить видео звонок на серверный компьютер, (при помощи, например, программы Skype [10]) с целью установления видео наблюдения за поведением модели робота.

Запустить на выполнение файл «EdpCtrlClient\_v005.py» щелкнув по нему мышкой или нажав клавишу Enter, после его выделения. В случае правильной установки всех программ, консоль должна показать приглашение к вводу имени аккаунта XMPP, как на рис. 4.

После ввода имени созданного Вами

аккаунта и его пароля программа должна запросить имя аккаунта серверной части. Выполните это действие. Может быть выдано некоторое предупреждение, что не является большой проблемой и можно не обращать на него внимание. Произведите тестовое управление роботом с клавиатуры, наблюдая за откликом модели по видеоизображению Scure. Для того, чтобы заставить модель робота двигаться вперед нажмите клавишу со стрелкой вверх, вправо – со стрелкой вправо, влево — со стрелкой влево и если назад – стрелку назад. Чтобы остановить движение модели робота нажмите пробел. Выход из консоли управления организуется нажатием клавиши Esc, а выход из клиентской программы – подачей команды «exit()». Внешний вид используемых для тестирования программ приведен на рис. 5.

```

C:\Python26\python.exe
Hello
Welcom to remote edp-robot control.
Enter your jabber account name: _

```

Рис. 4. Проверка правильности установленного ПО для клиентского компьютера



Рис. 5. Внешний вид программ управления моделью робота снегоуборщика

#### 4. ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ СИГНАЛА (ВИРТУАЛЬНАЯ ЛАБОРАТОРИЯ)

Произведите оценку времени доступа к модели робота, нажав при запущенной клиентской программе клавишу F2. Программа

автоматически произведёт измерение среднего времени доступа к модели робота по 10 выборкам и выведет результат на экран. Этот режим наглядно демонстрирует рис. 6.

Сравните времена доступа к различным XMPP-серверам, определенных вами на предыдущих этапах выполнения работы.

```

FreeCommander - DOS - python -i EdpCtrlClient_v004.py
From: edp_robot@jabber.ru/4095458103
Msg: ping 4
Current pingtime is 0.078 s.
-----
From: edp_robot@jabber.ru/4095458103
Msg: ping 5
Current pingtime is 0.063 s.
-----
From: edp_robot@jabber.ru/4095458103
Msg: ping 6
Current pingtime is 0.070 s.
-----
From: edp_robot@jabber.ru/4095458103
Msg: ping 7
Current pingtime is 0.086 s.
-----
From: edp_robot@jabber.ru/4095458103
Msg: ping 8
Current pingtime is 0.070 s.
-----
From: edp_robot@jabber.ru/4095458103
Msg: ping 9
Current pingtime is 0.078 s.
Average pingtime is 0.073 s.

```

Рис. 6. Проверка времени доступа к модели робота

## 5. РАЗВОРАЧИВАНИЕ И ТЕСТИРОВАНИЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НА СЕРВЕРНОМ КОМПЬЮТЕРЕ (РАБОТА В АУДИТОРИИ)

Данный пункт не реализуем дистанционно и предназначен для понимания полной картины работы всей системы и приводит алгоритм разворачивания серверной части.

Сборку серверного компьютера следует начинать с организации связи с моделью робота через Bluetooth канал. Для этого потребуется следующее оборудование и программное обеспечение (ПО):

1. Модель робота с заряженными аккумуляторами;
2. Bluetooth USB Dongle (адаптер для подключения компьютера к сети Bluetooth);
3. Программа Bluesoleil;
4. Драйверы для Bluetooth USB Dongle.

Подключите адаптер Bluetooth к компьютеру и установите драйверы на него, следуя инструкциям мастера.

Установите программу Bluesoleil [11], также следуя инструкциям.

Включите питание робота и поставьте его на широкую, свободную от препятствий, плоскую поверхность, например стол.

При установке Bluesoleil в области уведомлений Windows должна появиться иконка Bluetooth (синего цвета), при щелчке по которому запускается окно Bluetooth-окружения. Если значок серого цвета, то необходимо сначала включить Bluetooth устройство, щелкнув по нему два раза правой кнопкой мыши. Следует выполнить обнаружение всех Bluetooth устройств находящихся поблизости от Вашего компьютера, нажав на иконке «Поиск

устройств». После этого в окне должно появиться новое устройство с именем HC-05, как на рис. 7.

Дальнейшим шагом будет согласование компьютера с этим устройством. Для этого из контекстного меню иконки устройства следует выбрать пункт «Согласовать». В появившемся новом окне ввести пароль от этого устройства — 1234 и нажать на кнопку «ОК». После этого значок изменится и станет таким, как на рисунке 7. Установите связь с моделью робота через последовательный Bluetooth порт, вызвав соответствующий пункт контекстного меню иконки. Запомните номер COM порта, через который будет установлена связь. В результате этих действий цвет значка изменится на зеленый, а в области уведомлений панели задач появится соответствующее сообщение.

Перед запуском программы «EdpCtrlServer\_v004.py», необходимо произвести установку требуемого для её работы программного обеспечения, в которое должно входить:

1. Интерпретатор языка Python
2. Модуль PyWin32 для доступа к функционалу WinAPI операционной системы Windows на языке Python;
3. Модуль pyserial для доступа к последовательному порту (COM) компьютера на языке Python;
4. Модуль xmppru для связи по протоколу XMPP с клиентским сервером на языке Python;
5. Модуль pydns для определения программами, на языке Python, IP адресов, в интернете, по доменному имени (в данном случае определение IP адреса аккаунта на сервере XMPP).

Кроме этого, на компьютере должен иметься сам файл «EdpCtrlServer\_v004.py», который

содержит текст программы на языке Python серверной части. Подобно тому, что было для клиентской части, потребуется создать второй аккаунт на удобном Вам сервере поддерживающим XMPP протокол, но для работы с серверной частью.

Все перечисленные устанавливаемые программы можно найти в сети интернет. Программа «EdpCtrlServer\_v004.py» требует наличие тех же версий программных продуктов что для клиентской части. Но дополнительно требуется модуль pyserial. Рекомендуется использовать версию 2.7. Его установку следует выполнить после установки модуля PyWin32.

В остальном, установка других компонентов системы не отличается от клиентской части.

Связь между серверной программой и моделью робота реализуется через Bluetooth

COM порт, номер которого необходимо прописать в тексте серверной программы. Для указания номера порта нужно открыть файл «EdpCtrlServer\_v004.py» в любом текстовом редакторе. Затем найти строку вида «Com=serial.Serial...» с обращением к функции и заменить в ней первый аргумент на номер COM порта, который был выдан компьютером Bluetooth устройству HC-05 при подключении к нему.

Тестирование работы серверного компьютера лучше начать с запуска на выполнение файла «EdpCtrlServer\_v004.py» по аналогии с тем, как это было сделано для клиентской части. В случае правильной установки всех программ, консоль должна показать приглашение к вводу имени аккаунта XMPP, как на *рис. 8*.

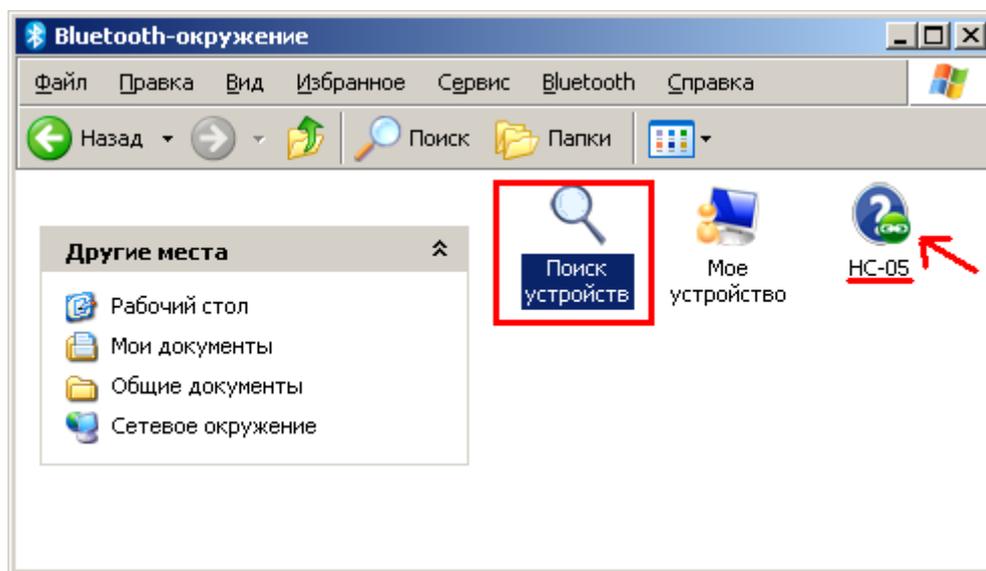


Рис. 7. Окно Bluetooth-окружения при согласованном устройстве HC-05



Рис. 8. Проверка правильности установленного ПО для серверного компьютера

После ввода имени аккаунта и его пароля возможно появление предупреждения подобного тому, что выдавала клиентская программа — не обращаем на это внимание. Произведите пробное управление роботом клавишами со стрелками и пробелом подобно тому, что было проделано на клиентском компьютере. Если Bluetooth канал настроен правильно, то модель робота начнёт откликаться на команды. Выход из консоли управления роботом происходит по нажатию клавиши Esc. Прекращение выполнения программы «EdpCtrlServer\_v004.py» производится вводом команды «exit()».

## 6. ПРИМЕР КОНТРОЛЬНЫХ ВОПРОСОВ

Ниже приводится пример вопросов для самоконтроля усвоения учебного материала.

1. Перечислите основные элементы системы изучаемой в данной работе и объясните их назначение.
2. Перечислите все программно-аппаратные модули, реализованные в модели робота и поясните их назначение.
3. Расскажите о назначении устанавливаемого программного обеспечения для

клиентской части системы.

4. Расскажите об основных отличительных особенностях протокола XMPP, и чем он отличается от Jabber.

5. Поясните путь прохождения команд управления моделью робота.

6. Расскажите о назначении устанавливаемого программного обеспечения для серверной части системы.

7. Поэтапно расскажите об установлении беспроводной связи с моделью робота.

8. Как организован механизм расчета времени доступа к модели робота?

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] XMPP Материал из Википедии — свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/XMPP>.
- [2] Python Материал из Википедии — свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Python>.
- [3] Bluetooth Материал из Википедии — свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>.
- [4] Lego Mindstorms [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.lego.com/en-us/mindstorms/>.
- [5] STM32VLDISCOVERY. Discovery kit for STM32F100 Value Line - with STM32F100RB MCU. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/S1532/LN1199/PF250863?s\\_searchtype=partnumber](http://www.st.com/web/catalog/tools/FM116/SC959/S1532/LN1199/PF250863?s_searchtype=partnumber).
- [6] А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. Построение платформы моделирующей работу роботизированных средств на базе конструктора Lego Mindstorms NXT 2.0 в части управления электродвигателями. // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 3 (1). С. 88-94. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-13.pdf>.
- [7] А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. Реализация дистанционного управления по радиоканалу Bluetooth платформой, моделирующей работу роботизированных средств. // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 3 (1). С. 82-87. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-12.pdf>.
- [8] А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. Беспроводной удлинитель последовательного порта на базе радиоканала Bluetooth. // Автоматика и программная инженерия. 2013. № 2 (4). С. 42-47. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/5/AIPI-2-2013-05.pdf>.
- [9] 7-Zip. File archiver with a high compression ratio. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.7-zip.org/>.
- [10] Skype. Бесплатные звонки на мобильные и стационарные телефоны. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.skype.com/ru/>.

- [11] Bluesoleil. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bluesoleil.com/index.aspx>.



**Алексей Викторович Ескин** – ведущий инженер ООО «КБ Автоматика»,  
E-mail: [kba-elma@bk.ru](mailto:kba-elma@bk.ru)



**Вадим Аркадьевич Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 200 научных статей, включая 10 патентов и 6 учебных пособий. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.  
E-mail: [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@bk.ru)



**Виталий Геннадьевич Трубин** - зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика». Автор 18 научных статей. Область интересов – разработка специализированной электроники.  
E-mail: [trubin@ngs.ru](mailto:trubin@ngs.ru)



**Печников Андрей Львович**, вед. инженер ООО «КБ Автоматика». Сфера интересов - разработка специализированной электроники.

## The use of Internet for Interactive Laboratory Work for the Distance Control of Robot-Snow-Fighting Vehicle

Vitaly TRUBIN, Aleksey ESKIN,  
Andrey PECHNIKOV, Vadim ZHMUD

*Abstract:* The paper describes firmware and gives methodical receipts for laboratory work for students which pass training course according the project TEMPUS-MPAM, and also for fifth-year students on the education direction “220400.68 – Control in Technical Systems”, Master Program “Complex Systems of Automation”. The goal of the work is study of remote control of acting robot model with the helps of protocol XMPP with visual control of the results by means of software Skype.

*Key Words:* Mechatronics, Automation, Remote Control, Robotics, Higher Technical Education, Double-Diploma Master Program.

# Прецизионные измерения частоты для аттестации частотных стандартов

В.А. Жмудь, Новосибирск, НГТУ

**Аннотация:** Рассматриваются методы прецизионных измерений частоты. Указаны недостатки счетного метода, даны основы метода целочисленных периодов. Даны структурная схема устройства и описание программы, реализующей обработку результатов первичных измерений для получения требуемых отсчетов частоты.

**Ключевые слова:** Измерения частоты, параметры Аллена.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы измерения расстояний в глобальной спутниковой системе ГЛОНАСС тесно связаны с проблемой измерения времени. Единицы времени (частоты) и длины могут быть согласованы с помощью соотношения  $\lambda\nu = c$  согласно теории о постоянстве и независимости от времени скорости света, а также скорости распространения любого электромагнитного излучения в вакууме. Следовательно, измеряя длительности интервалов времени, можно измерять расстояния при наличии соответствующих схем, преобразующих расстояние в интервалы времени. Консультативный комитет по определению метра сформулировал в 1973 г. рекомендацию, согласно которой величина скорости света определяется с помощью частоты излучения лазера на гелий-неоновой смеси, стабилизированного по переходам в метане [1]. Таким образом, актуальна задача измерения интервалов времени с высокой точностью, а также задача повышения точности формирования частоты, служащей эталоном времени.

Решение указанных задач требует создания прецизионных быстродействующих измерителей частоты во времени.

## 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Относительная нестабильность современных стандартов частоты оценивается во временной области по функции двухвыборочной дисперсии Аллена, определяемой как [2]

$$\sigma_y^2(2, \tau) = \frac{1}{2} \left\langle \left( \bar{y}_{i+1}(\tau) - \bar{y}_i(\tau) \right)^2 \right\rangle, \quad (1)$$

где  $\bar{y}_i(\tau)$ ,  $\bar{y}_{i+1}(\tau)$  – средние значения частоты на смежных временных интервалах длительностью  $\tau$  секунд каждый, с нулевым «мертвым» временем  $\tau_M = 0$  между ними. Угловыми

скобками обозначено статистическое среднее по ансамблю пар измерений, которое в эксперименте заменяется усреднением во времени.

Оценка стабильности частоты высокостабильных систем осуществляется по методике, рекомендованной подкомитетом ИИЭИР [2]. Эта методика основана на измерении разностной частоты двух стандартов частоты.

Измерительная установка содержит два идентичных генератора и устройство выделения разностной частоты. Если разностная частота  $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$  в среднем равна нулю, то для удобства измерения, её необходимо перенести на выбранную несущую частоту  $F$  в радиодиапазоне. Это реализуется с помощью дополнительного генератора – гетеродина.

Для случая использования лазерных эталонов частоты смешение оптических частот осуществляется на фотоприемниках, а перенос на промежуточную частоту осуществляется гетеродинным лазером с системой фазовой автоподстройки частоты [3]. При этом частота третьего лазера равна частоте второго лазера с заданной добавкой:  $\nu_3 = \nu_2 + F$ , а измерению подлежит частота биений между первым и третьим лазерами:  $y = \nu_3 - \nu_1 = F + \Delta\nu$ .

В последнее время резко возрос интерес к значениям оценки (1) за малые  $\tau \in [10^{-3} \div 10^0 c]$ , а при таких временах осреднения обычные электронно-счетные частотомеры не обеспечивают требуемой точности измерения  $\bar{y}_i(\tau)$  и обладают недопустимо большим значением  $\tau_M \approx 0,1 \div 10 \text{ мс}$  при перезапусках, тогда как необходимо обеспечить  $\tau_M = 0$ .

Учет этих требований потребовал разработку специального частотомера, обеспечивающего  $\tau_M = 0$ . Первым отечественным прототипом такого устройства была разработка Института лазерной физики СО РАН [4].

В ходе разработки и исследований выявились некоторые особенности поведения функции (1) в зависимости от значения  $\tau$ . На этой основе можно сформулировать предложения по модификации методики оценки стабильности частоты во временной области.

Основные проблемы возникают при  $\tau \ll 0,01c$  и при  $\tau \gg 1000c$ : в обоих случаях значение функции Аллена, как правило, резко возрастает. Это послужило причиной распространения мнения о том, что одна из

асимптот значения функции Аллена всех или большинства реальных генераторов, соответствующих  $\tau \rightarrow 0$  и  $\tau \rightarrow \infty$ , или обе, возрастают неограниченно.

Так Рютман [3] пишет: «График  $\sigma_y^2(\tau)$  в двойном логарифмическом масштабе состоит из отрезков прямых, наклон которых легко определить». «Для частотного фликкер-шума  $\sigma_y^2(\tau)$  не зависит от  $\tau$ ; соответствующий участок на графике часто называют фликкер-уплощением». «Для конкретного генератора  $\sigma_y^2(\tau)$  представляет собой сумму двух или трех членов; так атомные стандарты на цезиевом пучке часто удовлетворительно моделируются с использованием выражения

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{h_0}{2\tau} + 2 \ln 2h_{-1}. \quad (2)$$

При этом величины  $h_0$  и  $h_{-1}$  можно определить по данным измерений  $\sigma_y^2(\tau)$ , если  $\tau$  измеряется в достаточно широких пределах».

В работе [5] показано, что здесь Рютман ошибочно вводит в модель шума генератора результаты, определяемые шумом измерительного устройства. Поскольку  $\tau$  стоит в знаменателе, функция (2) возрастает при  $\tau \rightarrow 0$  неограниченно. Это не может относиться к шуму генератора, поскольку спектр частотного шума ограничен по частоте.

Также в работе [5] показано, что Рютман ошибочно увязывает подъем функции (1) с возрастанием  $\tau$  с линейным уходом частоты.

Также в работе [5] вскрыто третье противоречие, которое состоит в том, что, если стандарт частоты имеет линейную регрессию частоты, то следует оценить и указать либо пределы допустимых изменений этой частоты, либо временные рамки для указанной регрессии. В противном случае частота, изменяясь непрерывно с постоянной скоростью в одном направлении, может достичь любого значения, что, разумеется, не соответствует ни одному реально существующему стандарту, и даже не может соответствовать ни одному реально существующему генератору частоты, пусть даже не отличающемуся высокой стабильностью частоты формируемого сигнала.

На средних значениях  $\tau$  Рютман ожидает получение плоского участка, что хорошо согласуется с экспериментом.

Опыт изучения частотных шумов генератора и разработки аппаратуры для их измерения позволяет удостовериться в справедливости указания на эти противоречия.

Можно утверждать следующее:

1. Подъем получаемой оценки функции Аллена с уменьшением  $\tau$  связан с аппаратной погрешностью цифрового измерителя частоты, а вовсе не со свойствами шумов генератора. Истинная дисперсия Аллена любого физически

существующего генератора описывается ниспадающей при  $\tau \rightarrow 0$ , а не возрастающей асимптотой. Поэтому любые аппаратные средства для измерения функции (1) при  $\tau \rightarrow 0$  становятся недостаточно адекватными при  $\tau < \tau_{MIN}$ , где  $\tau_{MIN}$  - минимальное значение величины  $\tau$ , при котором аппаратура измерения вносит в погрешность результата измерения собственный вклад не более 50 %.

2. Подъем получаемой оценки функции Аллена с увеличением  $\tau$  связан с двумя факторами: а) с аппаратной погрешностью цифрового измерителя частоты вследствие прерывания процессов измерения; б) со статистически недостаточным объемом выборки. Этот подъем вовсе не связан со свойствами шумов генератора. Истинная дисперсия Аллена любого физически существующего генератора описывается ниспадающей при  $\tau \rightarrow \infty$ , а не возрастающей асимптотой. Поэтому не каждые аппаратные средства для измерения функции (1) при  $\tau \rightarrow \infty$  остаются адекватными (достаточно точными).

3. Большинство аппаратных средств в ходе одного эксперимента может осуществлять сбор данных лишь для измерения одной точки функции (1), соответствующей единственному значению  $\tau$ . При применении таких средств проблематично обеспечение статистически надежных результатов метрологической аттестации частотных стандартов.

4. Многие аппаратные средства обладают мертвым временем. Такие средства непригодны для метрологической аттестации частотных стандартов.

5. Большинство известных аппаратных средств обладают ограничением на длительность измерительного интервала  $\tau$ . Такие аппаратные средства непригодны для аттестации частотных стандартов в области таких значений этих длительностей.

6. Для оценки статистической достоверности результата целесообразно получение достаточно плотно упакованных отсчетов значений функции (1) в зависимости от  $\tau$ : случайные девиации этой функции характеризуют погрешность этой оценки. Действительно, при изменении  $\tau$ , например, на 0,1%, существенного изменения оценки (1) не должно происходить.

Поскольку, как указано в п. 1, погрешность измерения оценки (1) с уменьшением  $\tau$  неминуемо растет, следует стремиться обеспечить по возможности наименьшее значение этой погрешности, которая задается асимптотой, зависящей от погрешности определения интервала.

### 3. ВЫЧИСЛЕНИЕ ОДНОГО ОТСЧЕТА ДИСПЕРСИИ АЛЛЕНА ТРАДИЦИОННЫМ ПУТЕМ

Рассмотрим пример реализации функции зависимости частоты от времени, например, на интервале от 0 до 120 с. Пример подобной идеальной функции, которая предположительно соответствует истинному изменению частоты, показан на рис. 1, здесь частота изображена в условных единицах.

Если бы устройство измерения могло измерить результат истинного среднего значения на последовательных интервалах, равных 20 с, были бы получены значения, приведенные в таблице 1, в строке  $y(\tau)$ . В следующей строке приведены разности полученных значений. Указанные разности далее возводятся в квадрат, суммируются и делятся на количество измерений, уменьшенное на единицу, что требуется для получения несмещенной оценки.

Таблица 1.

Истинные средние значения функции по рис. 1 на интервалах длительностью 20 с

№	1	2	3	4	5	6
$y(\tau)$	0,16372	1,30253	1,26742	0,862237	0,645812	0,809532
$\Delta y(\tau)$		1,13881	-0,0351	-0,40518	-0,21643	0,16372
$\Delta y^2(\tau)$		1,296888	0,001233	0,1641733	0,0468398	0,026804
$\Sigma \Delta y^2(\tau)$	1,535938					
$\Sigma \Delta y^2(\tau)/(N-1)$	0,307188					
$\sigma$	0,554245					

Таким путем осуществляется подсчет дисперсии Аллена, а также среднеквадратического отклонения (функции Аллена), равного квадратному корню из этой величины.

осредненных за время  $\tau$  значений частоты на интервале, начинающемся в момент  $t_j$  и оканчивающемся в момент  $t_j + \tau$ . Можно вычислить  $N-1$  отсчетов отклонения частоты на двух следующих друг за другом интервалах:

Пусть получено  $N$  выборок  $\bar{y}_k(t_j, \tau)$ ,

$$\Delta \bar{y}(t_j, \tau) = [\bar{y}(t_{j+1}, \tau) - \bar{y}(t_j, \tau)], j = [1, 2 \dots N - 1]. \quad (3)$$

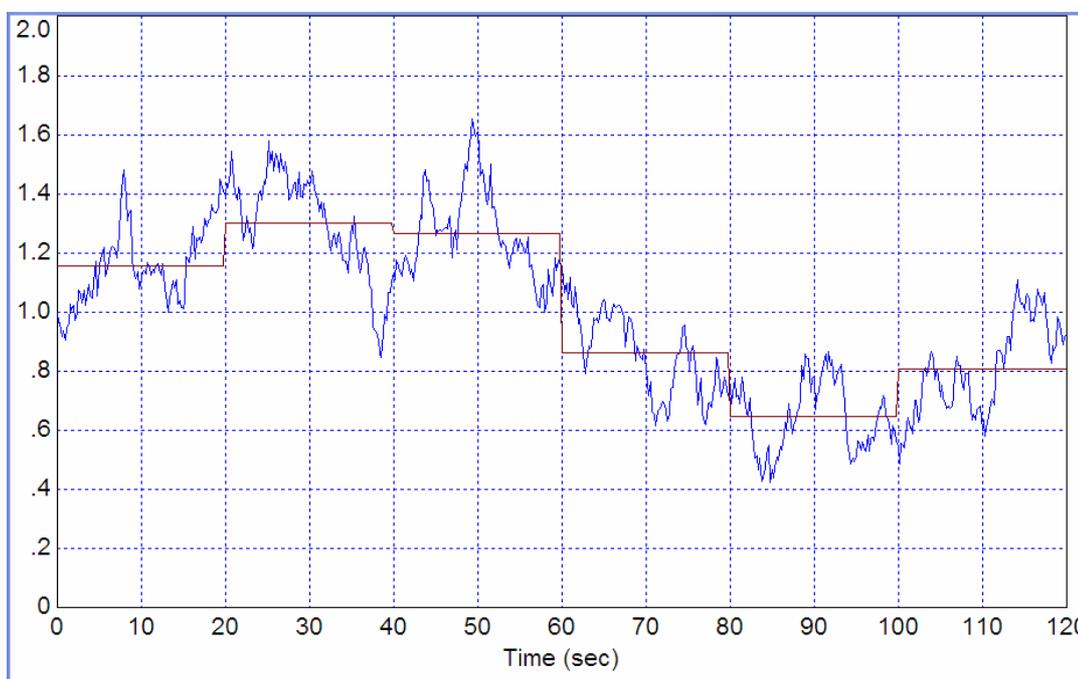


Рис. 1. Пример функции, изменяющейся во времени в течение 120 с, и средние значения на отрезках по 20 с

Квадрат этой величины даст отсчет среднеквадратического отклонения, зависящий от времени осреднения  $\tau$ , времени начала первого измерения  $t_j$ :

$$\Delta y^{-2}(t_j, \tau) = [\Delta \bar{y}(t_j, \tau)]^2. \quad (4)$$

Для замены операции статистического осреднения в уравнении (1) на осреднение во времени следует выделить непересекающиеся интервалы длительностью  $2\tau$ , после чего дисперсия Аллена находится в соответствии с уравнением статистической несмещенной оценки среднего значения:

$$\langle \sigma_y^2(\tau, N) \rangle = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \Delta y^{-2}(t_i, \tau). \quad (5)$$

Одним из условий корректности таких оценок является отсутствие «мертвого времени» на границах рассмотренных интервалов.

Предположим, частотомер обладает «мертвым временем», и погрешность его измерения составляет 1% на указанных интервалах. Отбросим в первой строке Таблицы 1 все знаки, кроме первых двух после запятой. В этом случае будет получено значение функции Аллена не 0,554245, а 0,581378. При этом погрешность составит -0,02713, то есть примерно 5%, эта погрешность кажется не слишком большой.

Рассмотрим теперь аналогичные измерения на интервалах длительностью в 1 с. Соответствующий график показан на рис. 2, а результат вычислений показан в Таблице 2.

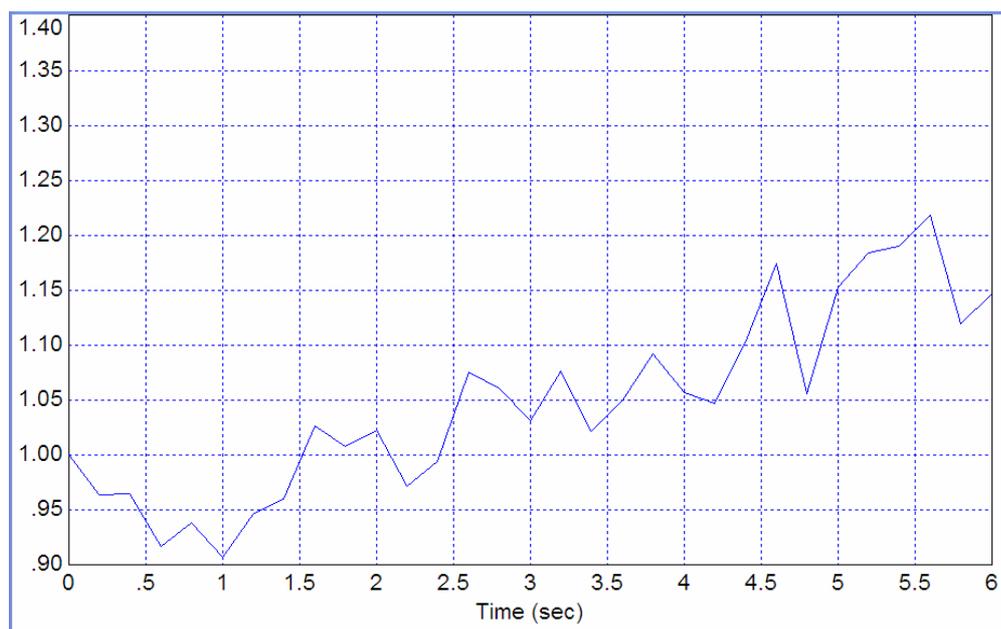


Рис. 2. Пример той же функции, изменяющейся во времени в течение 6 с

Таблица 2.

Истинные средние значения функции по рис. 1 на интервалах длительностью 1 с

№	1	2	3	4	5	6
$y(\tau)$	0,9584	0,971155	1,02661	1,05588	1,08857	1,17428
$\Delta y(\tau)$	0,01276	0,05546	0,02927	0,03269	0,08571	0,01276
$\Delta y^2(\tau)$	0,000163	0,003075	0,0008567	0,0010686	0,007346	0,000163
$\Sigma \Delta y^2(\tau)$	0,01251					
$\Sigma \Delta y^2(\tau)/(N-1)$	0,002502					
$\sigma$	0,050019					

Предположим теперь, что результат измерений также имеет ту же погрешность. Отбросим в первой строке Таблицы 2 все знаки после запятой, кроме первой. Получим новое значение функции Аллена, равное 0,063246. Погрешность составляет -0,01323, то есть 26%.

Видим, что относительное значение погрешности с уменьшением интервала измерения резко растет.

#### 4. ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ АЛЛЕНА ПРЕДЛАГАЕМЫМ ПУТЕМ

Принцип измерения функции Аллена, который, нами ранее предложен, реализован и исследован, можно назвать условно «методом целочисленных периодов» (МЦП). Он состоит в следующем.

1. Первичные интервалы измерения выбираются достаточно малыми, как правило, 1 мс.

2. Вместо осреднения частоты на указанных интервалах, осуществляется подсчет количества импульсов измеряемой частоты на этом интервале, а также измеряется точное время фронта первого импульса, попавшего в данный интервал.
3. Далее уточняется длительность фактического интервала, содержащего целое количество периодов.

Например, на *рис. 3* показан результат анализа первой последовательности на примере интервала длительностью 1 с при измерении частоты, равной 20,5 Гц. Предварительный (грубый) интервал начинается в момент  $t_{01} = 0$  с и заканчивается в момент  $t_{02} = 1$  с. Устройство определяет время начала первого положительного импульса  $t_1$ . Это время определяется встроенными часами измерителя. Время первого фронта составляет  $t_1 = 0,023148148$  с. В интервал от  $t_1$  до  $t_{02}$  попало 20 отрицательных фронтов импульсов (см. *рис. 3*). На *рис. 4* показан следующий этап измерения. Время первого положительного фронта в этом случае определено как  $t_2 = 1,0486111$  с. При этом на интервал от  $t_{02}$  до  $t_2$  попал еще один отрицательный фронт импульса. Таким образом, длительность полных двадцати одного периодов составляет  $t_2 - t_1 = 1,0486111 - 0,023148148 = 1,025463$  с. Для вычисления частоты следует количество импульсов разделить на длительность этого интервала, получим  $21 / 1,025463 = 20,47856$  Гц. Погрешность составила -0,021 Гц, то есть около 0,1 %. На третьем этапе измерений получаем  $t_3 = 2,0231481$  с. При этом на интервале от  $t_2$  до  $t_3$  получено лишь 20 отрицательных фронтов импульсов (см. *рис. 3* и 4). Длительность полных двадцати периодов составляет  $t_3 - t_2 = 2,0231481 - 1,0486111 = 0,974537$  с. Полученная частота на этом интервале равна  $20 / 0,974537 = 20,52257$  Гц. Погрешность равна +0,02257 Гц, то есть около 1,1 %. Отметим, что отрицательный фронт измерительных импульсов, имеющий место на границе между вторым и третьим грубыми измерительными интервалами, то есть в момент близкий к времени  $t_{03} = 2$  с, будет сосчитан и отнесен к интервалу между моментами  $t_2$  и  $t_3$ , поскольку соответствующий счетчик, подсчитывающий количество счетных импульсов, не прекращает своего счета никогда.

Если бы измерение осуществлялось традиционным (счетным) способом, по которому работает большинство известных частотомеров, следовало бы осуществить подсчет количества импульсов за сформированный измерительный интервал, равный 1 с, и приравнять результат к значению средней частоты на этом интервале. Все счетчики работают в режиме чередования выполнения счета и остановки (необходимой для снятия показания результата счета), поэтому

между предыдущим подсчетом и новым подсчетом импульсов существует короткий интервал времени, когда счетчики не работают, поэтому не реагируют на входной сигнал. Также время называют «мертвым временем» счетчиков (и частотомера). При таком счетном методе средняя частота на первом интервале (см. *рис. 3*) получилось бы 20 импульсов, если считать положительные фронты, а также 20 импульсов, если считать отрицательные фронты. Результат измерения на первом интервале в обоих случаях составил бы 20 Гц, погрешность была бы равна -0,5 Гц, то есть -2,44 %, примерно в 24,4 раза больше, чем при предлагаемом способе. На втором интервале результат был бы следующим: подсчет положительных фронтов дал бы результат 20, подсчет отрицательных фронтов дал бы тот же результат. Таким образом, среднее значение частоты на этом интервале было бы равно опять 20 Гц, погрешность также была бы равна -0,5 Гц, то есть -2,44 %. Ошибка оба раза отрицательная. Дело в том, что фактически существующий фронт в момент на границе двух рассмотренных интервалов не был бы сосчитан ни при первом, ни при втором измерении. Также может оказаться, что он будет сосчитан либо только при первом измерении, либо только при втором измерении, а также существует некоторая вероятность того, что он будет сосчитан и при первом и при втором измерении. В зависимости от того, как сработают соответствующие счетчики, результат такого измерения на первом и втором интервалах может также дать 21 Гц на любом из этих интервалов, или на обоих этих интервалах. Погрешность также в этом случае составит величину 0,5 Гц, но только в этом случае положительную. На третьем интервале также было бы насчитано 20 импульсов, результат был бы определен как 20 Гц, но могут образоваться и такие интервалы, на которых результат составит 21 Гц.

По результатам детального рассмотрения этого примера можно наглядно увидеть, что при измерении частоты счетным методом максимальная возможная погрешность составляет один импульс на измерительный интервал. При условии пренебрежимо малой величины других погрешностей, куда входят погрешности формирования (или определения) длительности интервала, максимальная абсолютная ошибка частоты будет составлять  $\pm 1$  Гц. Если интервал времени равен  $\tau$  (секунд), то погрешность этого метода составит  $1/\tau$  (Герц). Бытует ошибочное понятие о непреодолимом «соотношении неопределенности» для измерения частоты. Действительно, произведение длительности измерительного интервала на погрешность измерения частоты на этом интервале постоянно и составляет единицу (секунд  $\times$  Герц). С ростом измерительного интервала погрешность

измерения частоты на нем должна ниспадать обратно пропорционально длительности этого интервала, что в логарифмическом масштабе может быть показано прямой с единичным наклоном (один Герц на одну секунду). Это «соотношение неопределенности» ограничивает

лишь возможности счетного метода, но не столь критично при использовании МЦП.

Неопределенность чаще свойственна методу (и средствам) измерений, а не природе измеряемой величины [1].

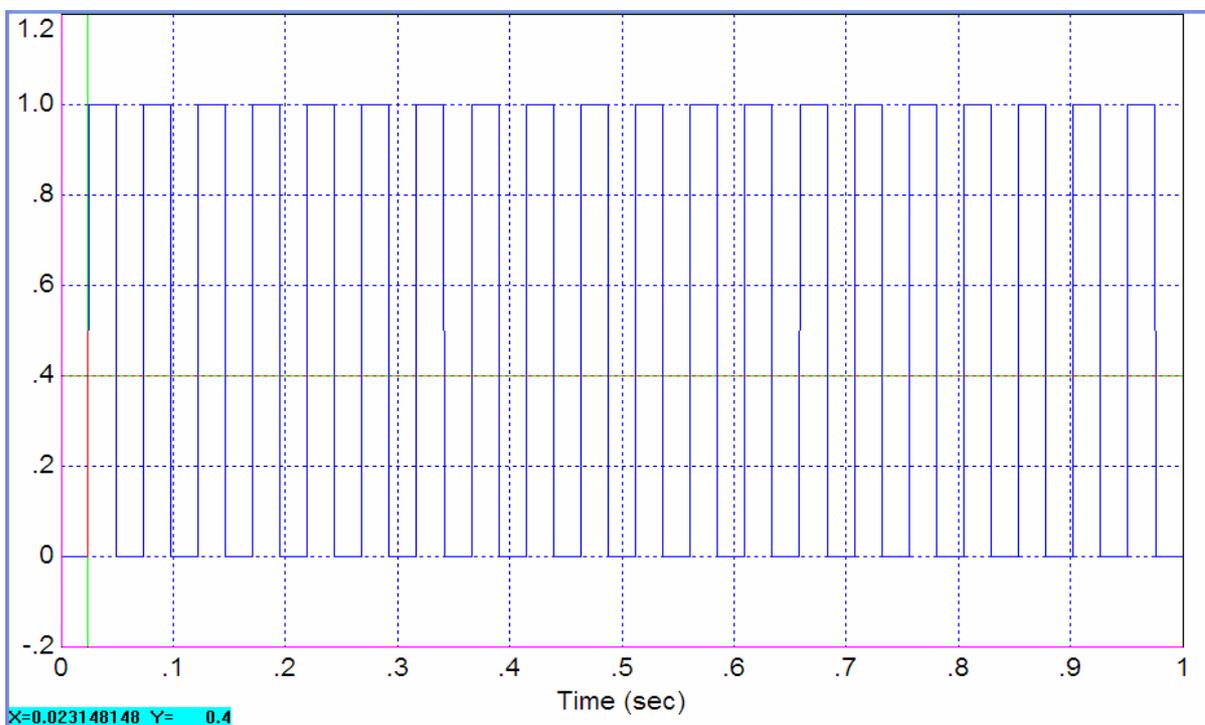


Рис. 3. Пример определения начала фронта на интервале и подсчета количества импульсов,  $t_1 = 0,023148148$

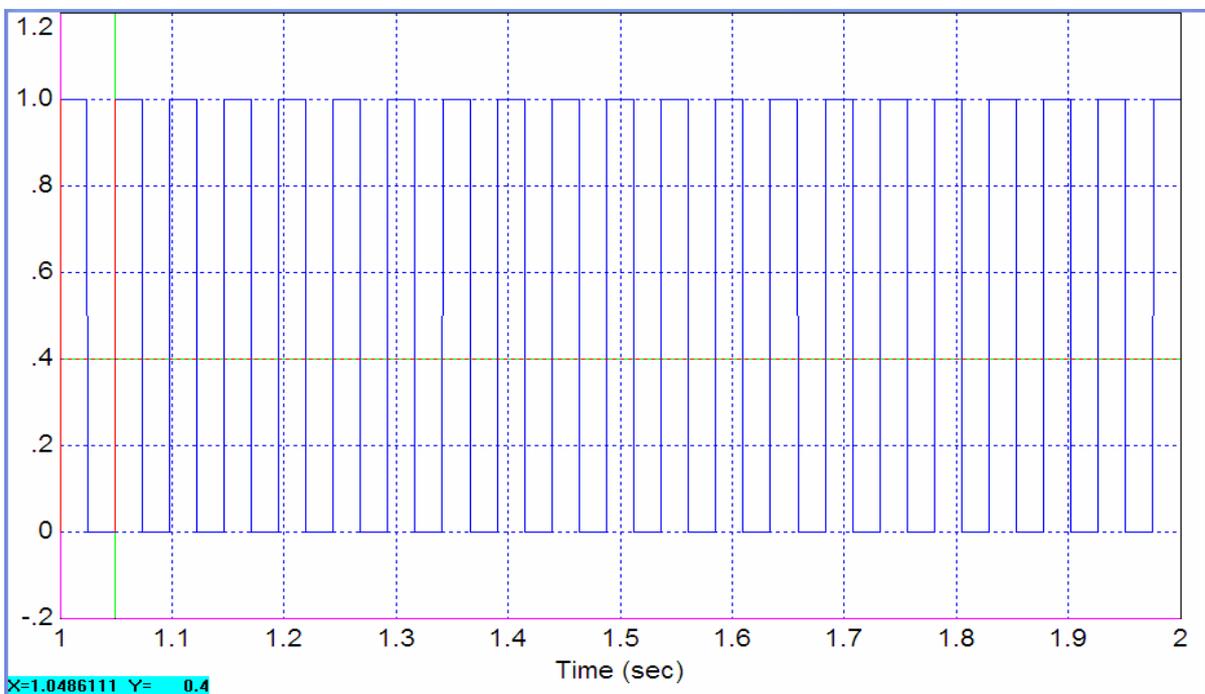


Рис. 4. Пример второго шага определения начала фронта на интервале и подсчета количества импульсов,  $t_2 = 1,0486111$

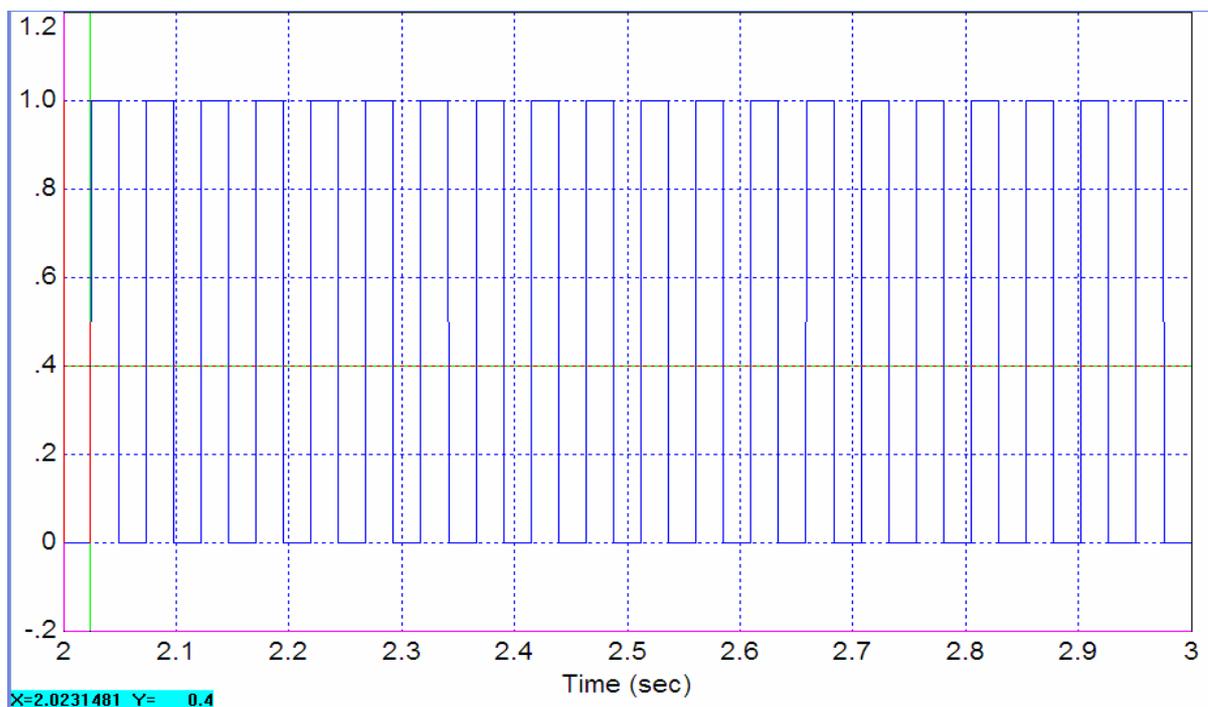


Рис. 4. Пример второго шага определения начала фронта на интервале и подсчета количества импульсов,  $t_2 = 2,0231481$

В МЦП погрешность определяется погрешностью измерения времени фронтов импульсов. Точная длительность интервала времени, на котором осуществляется подсчет количества периодов, всегда составляет целое количество периодов измеряемой частоты. За счет этого погрешность, которая в счетном методе равна величине, обратной длительности измерительного интервала, в предлагаемом методе существенно снижается: она может быть понижена в 1000 – 10 000 раз и более. В рассмотренном примере она понижена в 24 раза, поскольку определение момента времени фронта осуществлялось графическим путем, ошибка принципиально не может быть меньше, чем один пиксель изображения.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ СЧЕТНЫМ МЕТОДОМ НА БОЛЬШИХ ИНТЕРВАЛАХ

Пусть, например, требуется измерить среднюю частоту на вдвое более длительном интервале. Тогда результат может быть получен одним из двух следующих способов:

1. **Метод изменения интервала счета.** Частотомер может быть использован в новом режиме, при котором счетчики без остановки измеряют частоту на увеличенном интервале, в данном случае на интервале длительностью 2 с, то есть  $t_{01} = 0$  с до момента  $t_{03} = 2$  с, и так далее.

2. **Метод усреднения результатов счета.** Результаты измерений могут быть получены усреднением двух последовательно полученных результатов, например, интервале от  $t_{01} = 0$  с до  $t_{02} = 1$  с и на интервале от  $t_{02} = 1$  с до  $t_{03} = 2$  с, и так далее.

**Недостаток метода изменения интервала счета.** Использование этого метода требует значительного числа измерений для каждого значения функции Аллена. Например, если требуется построить график при изменении  $\tau$  от 1 с до 1000 с, и при этом выбран шаг 6 дБ (удвоение), то требуется 11 серий экспериментов, для измерения этой функции для значений, соответственно, для значений  $\tau = 1; 2; 4; 8; \dots 1024$  с. Если потребуется промежуточное значение  $\tau$ , оно сможет быть получено лишь с помощью дополнительной серии измерений.

**Достоинство метода изменения интервала счета.** Увеличение интервала вызывает соответствующее уменьшение погрешности, обратно пропорциональное этому увеличению. Также устраняется погрешность, вызванная потерянными или ошибочно дважды сосчитанным фронтом счетного импульса на границе измерительных интервалов.

Например, при использовании счетного метода по рассмотренному примеру был бы получен 41 импульс на интервале 2 с, что дало бы результат 20,5 Гц. Погрешность в данном случае была бы равна нулю за счет случайного удачного совпадения всех факторов. В целом погрешность может составить те же  $\pm 1$  импульс, что дает на интервале 2 с погрешность частоты  $\pm 0,5$  Гц. На интервале 4 с погрешность составит  $\pm 0,25$  Гц и так далее.

**Недостаток метода усреднения результатов** состоит в том, что погрешность при усреднении уменьшается не обратно пропорционально увеличению длительности, а лишь статистически. Как правило, в этом случае

достигается уменьшение погрешности лишь обратно пропорционально квадратному корню из коэффициента увеличения длительности интервала, то есть в рассмотренном примере погрешность составила бы  $\pm 0,707$  Гц. На интервале 4 с погрешность составит  $\pm 0,5$  Гц и так далее.

**Достоинство метода усреднения результатов** состоит в возможности получения набора значений функции Аллена для различных  $\tau$ , составленных из целого числа элементарных интервалов.

## 5. ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ МЕТОДОМ ЦЕЛОЧИСЛЕННЫХ ПЕРИОДОВ НА БОЛЬШИХ ИНТЕРВАЛАХ

При использовании метода целочисленных периодов увеличение длительности интервала может быть выполнено вычислением по ранее полученным результатам измерений, но при этом результат вычислений будет такой же, как если бы использовался метод изменения интервала счета.

Поэтому при использовании МЦП совмещаются достоинства обоих указанных методов, и устраняются их недостатки, а именно:

1. При увеличении интервала погрешность падает обратно пропорционально коэффициенту увеличения этого интервала.

2. Достигается получение набора значений функции Аллена для различных  $\tau$ , составленных из целого числа элементарных интервалов.

Действительно, в результате измерения частоты на первом интервале устройство получает точное значение времени первого фронта  $t_1$ , время первого фронта следующего интервала  $t_2$ , которое также является временем окончания первого интервала, а также значение целого числа периодов на первом уточненном интервале  $N_1$ . Результат расчета частоты определяется по соотношению:  $F_1 = N_1 / (t_2 - t_1)$ . Для определения частоты на втором интервале используются аналогичные исходные данные  $F_2 = N_2 / (t_3 - t_2)$ , при этом время начала второго интервала  $t_2$  совпадает со временем конца первого интервала.

Среднее значение этих двух отсчетов может быть вычислено из тех соображений, что началом суммарного интервала является начало первого интервала, концом суммарного интервала является конец второго интервала, количество импульсов определяется суммой количества импульсов на двух соседних интервалах, а точное значение времени конца первого интервала и начала второго интервала в результате не входит:  $F_2 = (N_1 + N_2) / (t_3 - t_1)$ .

Так в рассмотренном случае (см. рис. 3–5) среднее значение частоты на интервале в 2 с будет равно:  $F = 41 / (2,0231481 - 0,023148148) = 20,50000049$  Гц. Относительная погрешность составляет  $2,4 \cdot 10^{-6}$  %.

Дополнительным преимуществом такого метода состоит возможность вычисления частоты за все возможные длительности интервалов, составляемые из целого числа элементарных интервалов длительностью  $\tau_{\text{мин}}$ . Целесообразность получения этих отсчетов состоит в том, что значения функции Аллена за длительности, отличающиеся на небольшую величину, не должны слишком сильно отличаться, поэтому их отличие характеризует погрешность измерения, по которой можно сделать вывод о достаточности или недостаточности статистических данных для полученного отсчета.

## 6. АВТОРСКИЙ ПРОТОТИП УСТРОЙСТВА ДЛЯ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИСПЕРСИИ АЛЛЕНА ПРЕДЛАГАЕМЫМ ПУТЕМ

Учет высоких требований к разработке измерителя нестабильности частот привел к разработке под руководством руководителя данного проекта специального частотомера, который удовлетворяет условию  $\tau_M = 0$  и исключает соответствующую компоненту инструментальной погрешности. Разработанное нами программное обеспечение позволяет оперативно рассчитывать и отображать параметр Аллена по текущей выборке.

### 6.1. Аппаратная часть

Основа измерительного устройства - персональная ЭВМ, выполняющая функции формирователя измерительного интервала, блока обработки и индикации. Дополнительная аппаратная часть минимальна: частотомер содержит генератор опорной частоты, счетчики со схемой управления и формирователь счетных импульсов (рис. 5). Эпюры сигналов показаны на рис. 6.

Формирователь преобразует исследуемый сигнал в последовательность счетных импульсов той же частоты {сигнал 1}. Схема синхронизации формирует сигналы {3}, синхронизованные с фронтами сигналов {2} от образцового генератора. Счетчик 1 подсчитывает количество этих импульсов {3} за каждый измерительный интервал. Счетчик 2 измеряет длительность измерительного интервала в базе времени импульсов {2} с выхода образцового генератора.

Сигнал {4} от интерфейса ПЭВМ инициализирует окончание предыдущего цикла измерения и эталонного интервала времени длительностью  $\tau$ .

Этот сигнал синхронизируется инверсными импульсами {5} от образцового генератора, поэтому фронты полученного синхронизованного сигнала {6} никогда не совпадают с фронтами сигналов {3} и {2}.

Этим обеспечивается возможность корректного считывания по фронту сигнала {6} кодов, накопленных в этих счетчиках.

Поскольку счет импульсов во время работы в такой схеме не прерывается, «мертвое время» отсутствует.

Разрядность каждого счетчика обеспечивает его переполнение не чаще одного раза за  $1с$  при  $\tau = 10^{-3}с$ . Поэтому результат счета определяется вычитанием предыдущего значения кода из текущего. В случае переполнения счетчика результат вычитания становится отрицательным. Тогда к этой отрицательной величине добавляется значение емкости счетчика, что восстанавливает истинное значение результата счета в данном цикле. Результатом измерения за каждый цикл является средняя за этот период частота исследуемого сигнала, которая определяется как отношение приращений кодов первого и второго счетчиков, умноженное на частоту образцового генератора. Для формирования измерительного периода используются электронные часы, встроенные в ЭВМ. Высокой точности формирования этого периода не требуется (достаточно 6-7 порядков), поскольку осреднение образцовой и измеряемой частот ведется за одно и то же время.

Третий счетчик совместно с формирователем импульса ошибки дискретизации и схемой растяжки импульса позволяет уточнять результат измерения до дробных долей периода измеряемой частоты и повысить точность измерения более чем на два порядка. С этой целью формирователь импульса ошибки квантования формирует импульс {7}, длительность которого несет информацию о временном сдвиге между фронтами сигналов {1} и {6}. Эта длительность дополнительно измеряется с высокой точностью, для чего схема растяжки импульса формирует выходной импульс {8}, длительность которого в заданное число  $M=500$  больше длительности входного импульса {7}. Счетчик 3 измеряет количество импульсов образцовой частоты {2} за время существования этого импульса {8}, и эта информация используется для коррекции предшествующего и последующего результатов:

Для многоканального измерения частот образцовый генератор, счетчик 2 и схема синхронизации 2 при этом остаются общими

для любого количества каналов. Этим обеспечивается единая шкала времени.

Аппаратная часть собрана на двух трехканальных таймерах КР1810ВИ54. Устройство позволяет непрерывно собирать сведения о величине средней за время  $\tau$  частоты в масштабе образцовой частоты внешнего или внутреннего сигнала. Причем минимальные интервалы  $\tau = 1мс$  следуют один за другим строго с нулевым зазором, что позволяет получать сведения об изменении частоты, усредненной за произвольные интервалы текущего времени, кратные  $\tau$ , существенно сокращая общее время наблюдения.

## 6.2. Программная часть

Если аппаратная часть формирует  $2N$  выборку  $\bar{y}(t_i, \tau)$  осредненных за общее время  $2N\tau$ , то можно получить  $N$  отсчетов частоты на двух соседних интервалах  $[t_i, t_i + \tau]$  и  $[t_i + \tau, t_i + 2\tau]$ . Квадрат разности этих величин даст отсчет величины  $\Delta \bar{y}_i^{-2}(\tau)$ :

$$\Delta \bar{y}_i^{-2}(\tau) = [\bar{y}(t_i + \tau, \tau) - \bar{y}(t_i, \tau)]^2 \quad (6)$$

Для эргодического процесса моменты  $t_i$  не имеют значения, важно лишь, чтобы эти отсчеты были независимыми (в частности, чтобы используемые временные интервалы не пересекались). Следует выделить ряд пар непересекающихся интервалов длительностью  $\tau$ , после чего оценка дисперсии Аллена находится в соответствии с известным соотношением:

$$\sigma_y^{-2}(\tau, N) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{\Delta \bar{y}_i^{-2}(\tau)}{N-1} \quad (7)$$

Таким образом, задача аппаратной части сводится к получению  $2N$  отсчетов  $\bar{y}_i(\tau)$  частоты, которые позволяют вычислить оценку  $\sigma_y^{-2}$

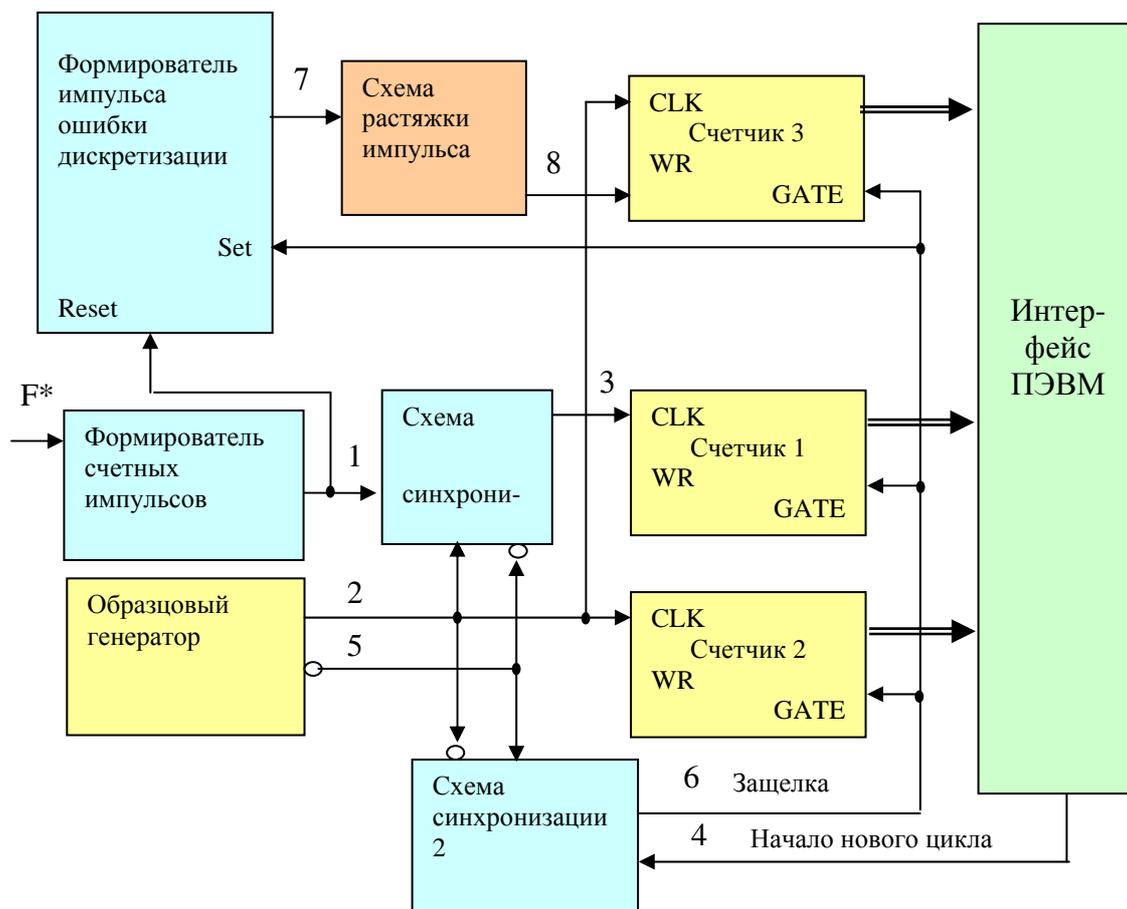


Рис. 5. Функциональная схема частотомера

Обычно, для получения  $K$  значений оценок параметров Аллена от различных величин  $\tau_k = k\tau, k \in [1, K]$ , по  $M$  выборкам каждое, следует выполнить  $M$  экспериментов. Минимальное время, необходимое для получения соответствующего значения  $\bar{\sigma}_y^{-2}(\tau_k, M)$  равно  $2M\tau_k$  и оказывается весьма значительным. Если все отсчеты  $\bar{y}_i(\tau)$  следуют один за другим с нулевым интервалом между ними, то из  $M$  отсчетов можно получить  $M - 1$  отклонений частоты, и для получения указанной характеристики потребуется при  $M \gg 1$  примерно вдвое меньшее время, равное  $\tau_k(M + 1)$ .

Обычный алгоритм вычисления следующий:

1. Получают как можно больше  $N$  последовательных независимых отсчетов  $\bar{y}_i(\tau)$  на интервалах осреднения длительностью  $\tau$ , следующими друг за

другом с нулевыми временными интервалами.

2. Для величины заданной минимальной  $\tau$  получают  $N - 1$  значений функции  $\Delta \bar{y}^{-2}(\tau)$ , которые позволяют вычислить значение дисперсии Аллена -  $\bar{\sigma}_y^{-2}(\tau, N - 1)$
3. Для величины  $\tau_k = k\tau$  можно получить  $M_i = \left(\frac{N}{k}\right) - 1$  значений функции  $\Delta \bar{y}^{-2}(k \cdot \tau)$  и вычислить значение дисперсии Аллена:  $\bar{\sigma}_{yk}^{-2} = \bar{\sigma}_y^{-2}(\tau_k, M_k)$ . С этой целью каждые  $k$  отсчетов частоты усредняются, результат приписывается интервалу длительностью  $k\tau$ .

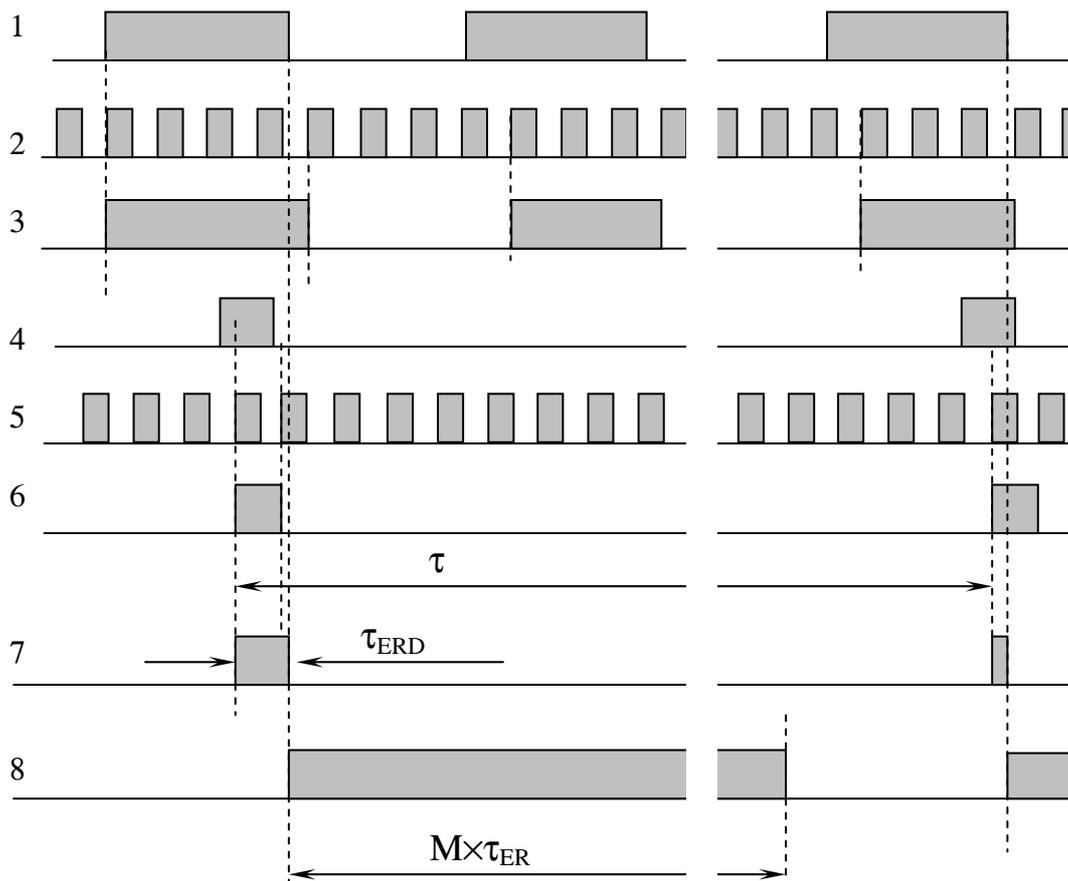


Рис.6. Эпюры сигналов схемы рис. 5

Данная методика расчета, определяющая результат измерений по окончании сбора данных, используется при аттестации генераторов.

Для оперативного контроля при настройках и отображения в темпе эксперимента графика функции  $\bar{\sigma}_{yk}^{-2}$  нами разработана программа для расчета этой величины в текущем времени.

Программная часть позволяет отображать 600 отсчетов  $\bar{y}_i(\tau)$  и любые 600 из 30000 значений  $\bar{\sigma}_{yk}^{-2}$  на экране монитора, которые вычисляются в реальном времени.

Рассмотрим работу алгоритма. Пусть

$$\Delta y_1^{-2}(k\tau) = \left( \frac{y_1 + y_2 + \dots + y_k}{k} - \frac{y_{k+1} + y_{k+2} + \dots + y_{2k}}{k} \right)^2 = \left( \sum_{i=1}^k \frac{y_i}{k} - \sum_{i=k+1}^{2k} \frac{y_i}{k} \right)^2$$

Добавка осуществляется только после получения  $k$  новых отсчетов, и на  $n$ -м шаге она равна:

$$\Delta y_n^{-2}(k\tau) = \left( \sum_{i=(n-1)k+1}^{nk} \frac{y_i}{k} - \sum_{i=nk+1}^{(n+1)k} \frac{y_i}{k} \right)^2 = (\Sigma_{n1} - \Sigma_{n2})^2 \quad (9)$$

Для накопления этих сумм выделены соответствующие ячейки. Как только накопится соответствующая сумма  $\Sigma_{n2}$ , осуществляется вычисление нового приращения  $\Delta y_{n+1}^{-2}(k\tau)$  по уравнению (7) и увеличивается сумма квадратов:

$S_i(k, m)$  - промежуточный массив данных, в котором копится сумма  $m$  квадратов соответствующих приращений:

$$S_i(k, m) = \sum_{j=1}^m \Delta y_j^{-2}(k\tau) \quad (8)$$

Первоначально в него заносятся нулевые значения. Первое приращение результата в ячейке этого массива с номером  $k$  произойдет после получения  $2k$  отсчетов  $\bar{y}_i$  и оно равно:

$$S_n(k\tau) = S_{n-1}(k\tau) + (\Sigma_{n1} - \Sigma_{n2})^2 \quad (10)$$

Следующий отсчет  $\bar{y}_i$  идет в накопление новой суммы  $\Sigma_{(n+1)2}$ , поскольку  $\Sigma_{(n+1)1} = \Sigma_{n2}$ .

Согласно (6), (7), (9): (11)  
Новое значение на  $(n+1)$ - шаге равно:

$$\sigma_y^{-2}(k\tau, n) = \frac{S_n(k\tau)}{n-1}$$

$$\sigma_y^{-2}(k\tau, n+1) = \frac{S_n(k\tau) + \Delta y_{n+1}^{-2}(k\tau)}{n} \quad (12)$$

Приращение на  $(n+1)$ -м шаге, согласно (4), (5) равно

$$R_{n+1}(k\tau) = -\frac{\sigma_y^{-2}(k\tau, n)}{n} + \frac{\Delta y_{n+1}^{-2}(k\tau)}{n-1} \quad (13)$$

Оно характеризует величину уточнения на этом шаге и имеет примерно тот же порядок, что и ошибка определения дисперсии Аллена по ограниченной выборке из  $n$  отсчетов.

Поскольку на графике отображаются значения функции  $\sigma_y^{-2}(k\tau)$  с малым шагом аргумента, равным  $\mathcal{T}$ , изменения этой функции легко выявляются визуально, поэтому величину (10) удобно использовать для оперативного контроля параметров Аллена в реальном времени.

Отметим, что в соответствии с описанием аппаратной части, отдельные отсчеты частоты

$\bar{y}_i(\tau)$  в базе времени частоты  $F_o$  образцового генератора получаются как отношение приращений кодов первого  $P_i$  и второго  $Q_i$  счетчиков (с поправкой, вычисленной по коду третьего счетчика):

$$\bar{y}_i(\tau) = F_o \frac{P_i - P_{i-1}}{Q_i - Q_{i-1}}$$

С учетом этого уравнение (8) принимает иной вид:

$$\Delta y_n^{-2}(k\tau) = F_o \left( \frac{P_{nk} - P_{(n-1)k+1}}{Q_{nk} - Q_{(n-1)k+1}} - \frac{P_{(n+1)k} - P_{nk+1}}{Q_{(n+1)k} - Q_{nk+1}} \right)^2 \quad (14)$$

Хотя эта формула более громоздка на вид, вычисление по ней гораздо проще, чем по (8), а умножение на  $F_o$  осуществляется масштабированием графика для отображения параметров Аллена. Из (13) видно, что промежуточные результаты отсчетов не входят в статистику для  $k \geq 2$ . В этом проявляется тот факт, что величина «мертвого времени» равна нулю.

### 6.3. результаты испытаний измерителя

При измерении частоты обычным методом погрешность в основном определяется ошибкой дискретизации, которая равна отношению периода измеряемой частоты к длительности измерительного интервала. Так при измерении частоты  $5МГц$  погрешность должна составлять  $500Гц$  за интервал времени  $\tau = 1мс$ .

В описанном частотомере эта величина меньше  $1Гц$ , и она уменьшается до  $0,004Гц$  при измерениях с понижением частоты до  $20кГц$  за эти же интервалы времени. Так при усреднении за время  $\tau = 0,1с$  она становится равной  $0,01Гц$  для измеряемой частоты  $5МГц$ .

С дальнейшим увеличением  $\mathcal{T}$  погрешность, практически, определяется только второй компонентой – нестабильностью

образцового генератора, которая может быть существенно понижена при работе от внешнего генератора, в частности, использованного нами водородного стандарта частоты Ч1-75 с нестабильностью частоты не более  $10^{-12}$ .

Таким образом, для измерения специальных характеристик стабильности частоты высокостабильных лазеров (генераторов) разработан прецизионный частотомер с абсолютной ошибкой измерений менее  $1Гц$  за  $0,001с$ , что обеспечивает относительную погрешность измерения частоты около  $10^{-5}$ . За счет реализации непрерывного (без перезапуска) счета существенно сокращено общее время измерения и исключена инструментальная погрешность от «мертвого» времени.

На рис. 7 показана зависимость погрешности указанного частотомера от времени усреднения в сравнении с погрешностью частотомера ЧЗ-64, традиционно используемого для аттестации стандартов частоты, включая водородные стандарты частоты. Видно, что разработанное устройство имеет ряд преимуществ:

1. Диапазон измерений расширен в область малых интервалов времени от 1 с до 0,01 с.
2. Погрешность во всем диапазоне частот снижена.

3. В диапазоне времен усреднения выше 1000 с погрешность у разработанного частотомера снижается обратно пропорционально отношению времен усреднения (а в логарифмической шкале линейно с единичным наклоном), тогда как погрешность частотомера ЧЗ-64 в этом диапазоне снижается обратно

пропорционально корню квадратному из отношения времен усреднения (а в логарифмической шкале – линейно с половинным наклоном)

На рис. 8 показан вид экрана компьютера при работе в режиме отображения частоты как функции времени.

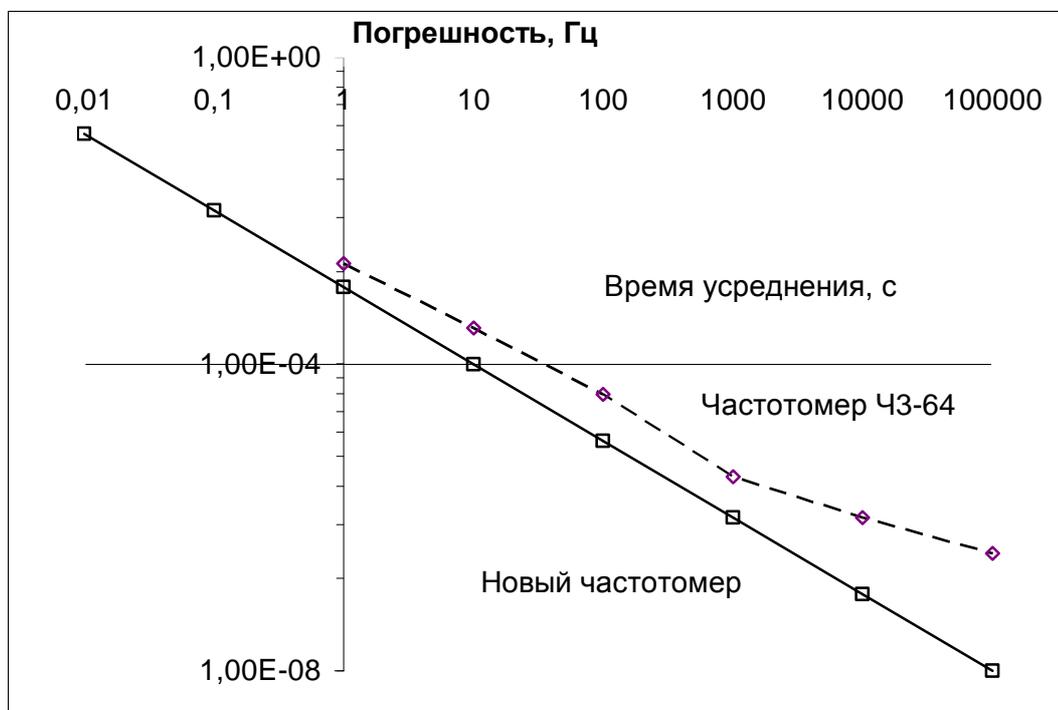


Рис. 7. Зависимость погрешности указанного частотомера от времени усреднения в сравнении с погрешностью частотомера ЧЗ-64

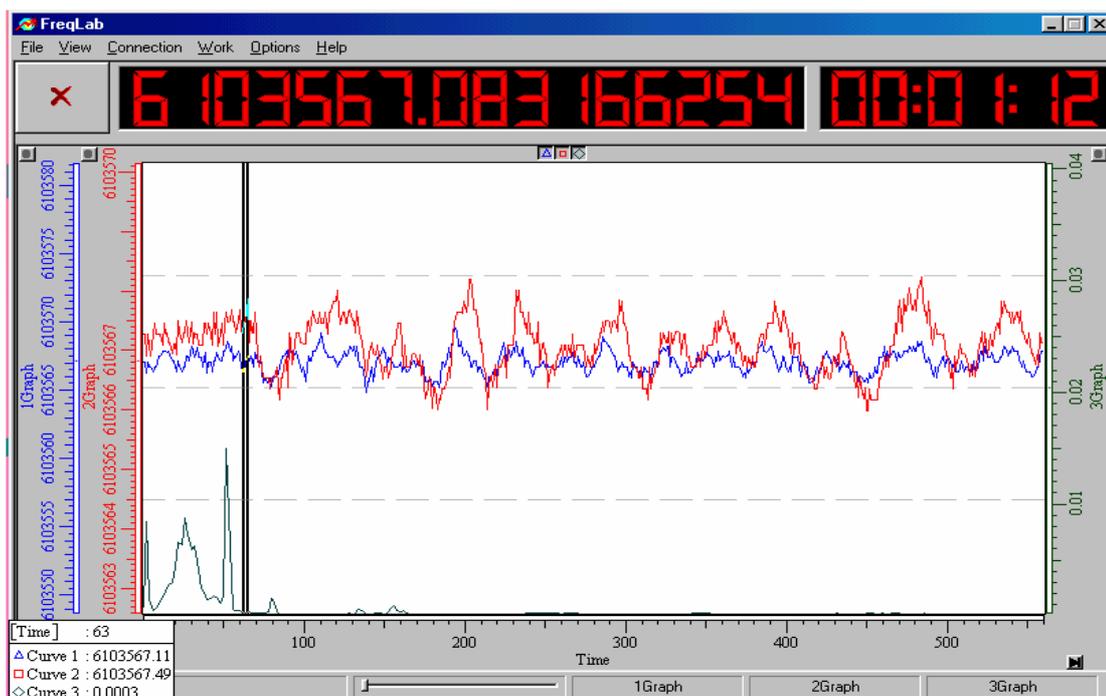


Рис. 8. Вид экрана компьютера при работе в режиме отображения частоты как функции времени

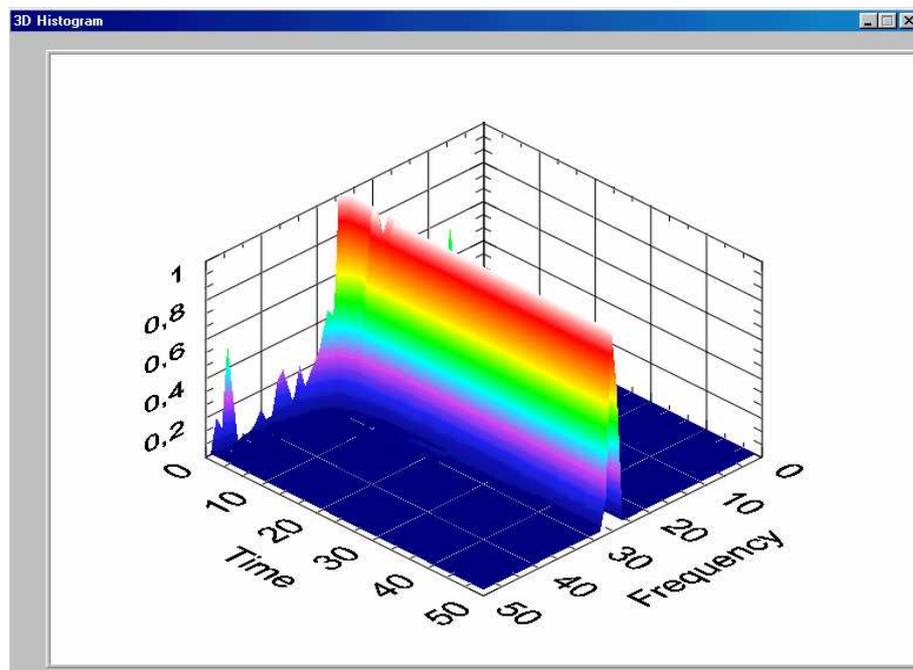
На рис. 9 показан вид экрана компьютера при работе в режиме отображения функции

Алена. На *рис. 10* показан результат построения 3D-гистограммы частотных девиаций. Указанных функций традиционные

частотомеры не реализуют. На *рис. 11* показан внешний вид первой авторской разработки, описанной в данном разделе.



*Рис. 9.* Вид экрана компьютера при работе в режиме отображения функции Аллена



*Рис. 10* Результат построения 3D-гистограммы частотных девиаций

На *рис. 12* показан внешний вид отладочной платы, которая предполагается для использования в новом частотомере



Рис. 11. Внешний вид первой авторской разработки, описанной в данном разделе



Рис. 12. Внешний вид отладочной платы, которая предполагается для использования в новом частотомере

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные программно-аппаратные средства для измерения частот непрерывно совершенствуются [6]. При этом описанные принципы используются и развиваются. Описанный и используемый способ измерения кардинально отличается от счетного метода, в котором погрешность составляет единицу счета, вследствие чего имеет место ложное соотношение неопределенности, согласно которому произведение абсолютной погрешности измерения частоты на время измерения является константой, приблизительно равной единице. При таком способе измерение за одну секунду не может

быть сделано с погрешностью менее  $1 \text{ Гц}$ , за десять секунд – менее  $0,1 \text{ Гц}$  и так далее. Уже в первых версиях описанного частотомера это ложное соотношение преодолено более чем на три порядка, то есть измерение частоты за одну секунду осуществлялось с погрешностью менее  $0,001 \text{ Гц}$ , а погрешность в  $1 \text{ Гц}$  достигалась на интервалах порядка  $0,001 \text{ с}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.И. Андрюшкин, Р.Н. Фаустов, В.П. Шелест. Фундаментальные физические константы и физика микромира. В кн.: Квантовая метрология и фундаментальные константы. Сб. статей. М., Мир, 1981., с.3-16..

- [2] Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: итоги развития за пятнадцать лет // ТИИЭИР, 1978. 66, №9. С. 70 - 102.
- [3] Бармасов С.В., Жмудь В.А. Аппаратура для фазовой автоподстройки разностной частоты двух лазеров. ПТЭ, 2000, N3, с. 104-106.
- [4] Борисов Б.Д., Васильев В.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Методика оценки стабильности стандартов частоты. // Автометрия, 2002, №3, с. 104 – 112.
- [5] В.А. Жмудь. Частотные измерения в прецизионных лазерных системах. Научный вестник НГТУ. 2002. N 2(13). с. 127-136.
- [6] Патент РФ N 2210785 (приоритет от 13.07.01.) Цифровой частотомер. В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Оpubл.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03.
- [7] В.А. Жмудь. Теорема Котельникова-Найквеста-Шеннона, Принцип Неопределенности и Теория Относительности. Автоматика и программная инженерия 2014. №1 (7). С. 127–136. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).



**Вадим Аркадьевич Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 200 научных статей, включая 10 патентов и 6 учебных пособий. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.  
E-mail: [oa0\\_nips@bk.ru](mailto:oa0_nips@bk.ru)

## Precision Measuring of Frequency for Attestation of Frequency Standards

Vadim ZHMUD

*Abstract:* The paper discusses methods of precision measuring of frequency. The paper discovers disadvantages of frequency counting method and gives the basis of the method of integer periods. Paper gives structure of the device and algorithmic basis of the according program for the processing of primary measuring results for the delivering of the demanded values of measuring of frequency.

*Key words:* Measuring of frequency, Allen (Afen) parameters (Function).

# Что такое АФН-эффект

Н.Р.Рахимов

ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В данной статье приведены результаты исследований эффекта anomalно высоких фотоэлектрических напряжений (АФН) в полупроводниковых плёночных системах. Исследована возможность использования оптрона открытого канала для оптоэлектронных систем на основе излучателя и АФН-приёмника. На базе АФН-плёнок разработаны новые оптоэлектронные системы различного назначения.

**Ключевые слова:** АФН-пленки, оптоэлектроника, научные сведения

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время вопросы исследования фотоэлектрических свойств полупроводниковых пленок привлекают все больше внимания специалистов. Пленки, обладающие эффектом anomalно высокого фотонапряжения (АФН), представляют теоретический и практический интерес при создании первичных преобразователей – приемников оптического излучения (ПОИ).

Согласно принятой модели [1] эта трансформация складывается из трех этапов.

Во-первых, из этапа создания фототока  $I_{\Phi_0}$ , обусловленного фотогенерацией и пространственным разделением неравновесных носителей на каждом микро- $p-n$ -переходе.

Во-вторых, из этапа возникновения элементарных напряжений на микро- $p-n$ -переходах в результате накопления объемных зарядов, создаваемых фототоком.

В-третьих, из этапа формирования anomalно большого фотонапряжения путем суммирования элементарных фотонапряжений на  $p-n$ -переходах.

Существующие ПОИ и устройства на их основе требуют обязательного применения источников питания. В них выходное напряжение, создаваемое  $p-n$ -переходом в вентильном режиме, заведомо ограничено шириной запрещенной зоны полупроводника. Одним из перспективных оптических методов неразрушающего контроля является оптоэлектронный способ на основе излучателя и АФН-приемника, который позволяет исключить внешний источник питания для ПОИ, снизить вес и габариты, обеспечивает полную электрическую развязку между цепями «светоизлучающий диод – ПОИ».

К настоящему моменту в области АФН-эффекта накоплен значительный теоретический

и экспериментальный материал, позволяющий утверждать, что АФН-эффект может быть получен при нанесении плёнок из любых полупроводниковых материалов. Несмотря на это, не найден единый механизм, который раскрывает физическую природу этого явления.

## 1. ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

В 1946 г. Польские ученые Старкевич, Сосновский и Симпсон [2] наблюдали фотонапряжения  $E_q = 1,2$  В в сульфиде свинца, у которого  $E_q = 0,4$  В, причем авторы не только отметили этот факт как некоторую физическую anomalию, но и высказали для его объяснения некоторые идеи.

Изучением обнаруженного АФН-эффекта занимались на первом этапе Р. Я. Берлага с сотрудниками [3], Швабе [4], Пивковский [5] и др. По получению и исследованию АФН-эффекта имеется много работ, мы же здесь ограничиваемся ссылкой на библиографию, приведенную в работах [6–10].

Интерес к физическим и прикладным аспектам АФН-эффекта существенно увеличился после того, как Пенсак и Голдстейн [11] показали, что фотонапряжение в пленках  $CdTe$  при комнатной температуре может достигать сотен вольт. Они выявили, что величина АФН зависит от толщины слоя и температуры подложки в процессе напыления пленки и для наличия большей подвижности при формировании АФН-эффекта в пленках теллурида кадмия важна температура подложки. Пенсак и Голдстейн показали, что оптимальная область температуры подложки лежит в пределах 150...200 °С, при температурах подложки 250 °С АФН-эффект отсутствовал.

В результате анализа технологического процесса напыления многочисленные исследователи показали, что для получения эффективных пленок необходимо сочетание оптимальных значений давления и состава остаточных газов в вакуумной камере, температуры подложки и испарителя пленки и угла напыления. В [2, 3] была предложена модель anomalно фотовольтаического эффекта, основанная на батарее из микро- $p-n$ -переходов. Позднее, Швабе [4], исследовавший зависимость фотонапряжения от угла падения света, обнаружил инверсию знака  $V_{\text{АФН}}$  при фронтальном освещении в пределах от 0 до 180 °С.

Этот результат, полученный на пленках  $PbS$ , не мог быть объяснен в рамках  $p-n$ -переходной

модели и вполне естественно, что Швабе предложил модель, основанную на батарее, в которой микрофотонапряжение возникает благодаря эффекту Дембера. Установлением таких зависимостей как  $V_{\text{АФН}}$  от интенсивности света, температуры и т. д. нельзя было однозначно выявить тот или иной механизм АФН-эффекта. Полученный результат не могли связывать с вкладом каждого микроэлемента, поэтому нужно было проводить такие эксперименты, которые для обоих механизмов приводили бы к диаметрально противоположным следствиям.

По мнению Э.И. Адировича с сотрудниками [1], которые развивали идею Швабе, результаты исследования угловых диаграмм в белом и монохроматическом свете могут служить критерием для определения физической причины возникновения АФН-эффекта.

Если АФН-структура представляет собой батарею  $p$ - $n$ -переходов, то очевидно, что при фронтальной освещенности в пределах  $0...180^\circ\text{C}$  инверсия знака  $V_{\text{АФН}}$  должна отсутствовать.

Если АФН-структура представляет собой батарею демберовских элементов, то в белом свете при фронтальном освещении в пределах  $0...180^\circ\text{C}$  знак фотонапряжения должен изменяться, однако, как показано в работе [12], возможен аномальный дембер-эффект. В этом случае знак дембер-эффекта не связан с направлением светового потока, а обусловлен различием скоростей поверхностей рекомбинации на различных гранях. Поэтому при аномальном дембер-эффекте, а также при фотовольтаическом эффекте на  $p$ - $n$ -переходах  $V_{\text{АФН}}$  не меняет знака при изменении угла падения света. В работе [13, 14] показано, что эта неопределенность устраняется, если производить угловые измерения  $V_{\text{АФН}}(\beta)$  при освещении пленок монохроматическим светом с различными длинами волн.

Таким образом, в работах [9, 10] доказано, что наличие инверсии знака  $V_{\text{АФН}}$  при изменении угла освещения в пределах  $0...180^\circ\text{C}$  однозначно свидетельствует о том, что АФН-эффект обусловлен демберовский механизм, а отсутствие инверсии не позволяет сделать однозначного вывода, ибо в этом случае может иметь место либо  $p$ - $n$ -переходный механизм, либо аномальный дембер-эффект. Эту частичную неопределенность устранили путем перехода к исследованию  $V_{\text{АФН}}(\beta)$  при освещении коротковолновым светом.

Аномальный дембер-эффект имеет место, когда скорость поверхностной рекомбинации на освещаемой грани достаточно велика, а на затемненной грани – мала. При длинноволновом возбуждении, т. е. при слабом поглощении света  $\alpha^*d < 1$  ( $\alpha^*$  – коэффициент поглощения,  $d$  – толщина пленки) градиенты концентраций

неравновесных носителей заряда и поток биполярной диффузии направлены не по световому потоку, а против него, вследствие чего знак демберовского  $V_{\text{АФН}}$  аномален. Если, однако, от возбуждения длинноволновым светом перейти в область коротких волн, то вследствие увеличения коэффициента поглощения генерация электронно-дырочных пар будет происходить только вблизи освещенной поверхности, направление потока биполярной диффузии станет независимым от скорости поверхностной рекомбинации и вместо аномального дембер-эффекта, имеющего место на длинных волнах, возникнет нормальный дембер-эффект. Следовательно, если АФН эффект обусловлен демберовским механизмом, то при возбуждении пленки достаточно коротковолновым светом возникает инверсия знака. Напротив, при  $p$ - $n$ -переходном механизме величина  $V_{\text{АФН}}(\beta)$  должна оставаться неинверсионной в условиях коротковолнового фронтального возбуждения.

Таким образом, комбинация угловых и спектральных измерений дает однозначный ответ на вопрос о природе микрофотоэлементов в АФН пленках [1, 6–10].

Полученные данные позволяют считать, что в пленках  $Ge$ ,  $Si$ ,  $INas$ ,  $Al_2Se_3$ ,  $GaAs$ ,  $PbS$  природа АФН-эффекта демберовская (фотодиффузионная), а в пленках  $CdSe$ ,  $CdTe$  и халькогенидных сплавов  $p$ - $n$ -переходная (фотовольтаическая).

## 2. РАЗВИТИЕ ТЕОРИИ АФН-ЭФФЕКТА

С момента обнаружения эффекта прошло около 70 лет, однако до сих пор нет единого взгляда на его природу. Автор настоящего сообщения обратил внимание на работы [2, 3], в которых высказывается предположение, что границы кристаллитов (ГК) в пленках могут быть причиной анизотропного поглощения света их объемом. В одном случае считается, что диэлектрические прослойки на ГК отражают свет, внося неравномерность в поглощение света; в другом – отражение происходит из-за того, что соседние кристаллиты имеют различное кристаллографическое строение, например кубическое и гексагональное, и вновь ГК способна отражать свет. Об анизотропии поглощения света металлическими пленками сообщалось в работе.

Известно, что пленки, обладающие АФН, обычно, получают термовакuumной конденсацией вещества на диэлектрические подложки (например, стекло). Такие пленки непрерывно растут в направлении молекулярного пучка и имеют столбчатую структуру. Изменение направления молекулярного пучка, например, путем изменения положения подложки – напылением на подложки, плоскость которых не перпендикулярна молекулярному пучку (косое напыление), ведет к точно такому же изменению

направления непрерывного роста пленок. Прекрасные микрофотографии, иллюстрирующие особенности роста пленок  $PbS$ , приведены в работах [6, 7], аналогичные иллюстрации существуют и для пленок других полупроводников и металлов.

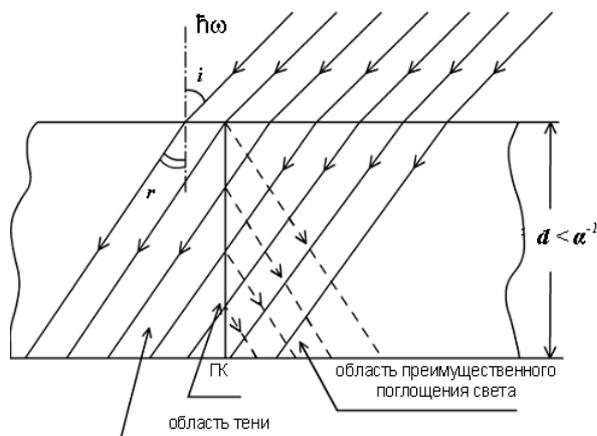
Сказанное свидетельствует, что плоскость ГК при термовакuumной конденсации пленок ориентирована в направлении молекулярного пучка. Более того, то же самое может происходить при получении пленок химическим осаждением из раствора, например, сверхпроводящие керамики имеют точно такую структуру. Столбообразный рост поликристаллических пленок легко понять, если принять во внимание тот факт, что формирование структуры пленок всегда происходит под жестким требованием минимальности свободной энергии. В данном случае это соответствует стремлению структуры в процессе роста иметь либо минимальную общую поверхность всех кристаллитов либо, что, по-видимому, точнее, кристаллит ограняет себя плоскостями с наименьшей поверхностной энергией, так что сумма произведений площадей поверхности на их поверхностную энергию оказывается минимальной.

Второй момент, требующий разъяснений, – это природа ГК. Обычно в поликристаллических пленках ГК представляют собой совокупность дислокаций (дислокационная стенка или дислокационная сетка), которые образуются вследствие разориентации соседних кристаллитов. Чем больший угол образуют между собой кристаллиты, тем меньшим должно быть расстояние между дислокациями. Это означает, что одним рядом дислокаций может быть образована ГК, которая разделяет кристаллиты, повернутые на угол не более нескольких градусов (что обычно и имеет место в поликристаллических пленках, растущих на ориентирующих подложках). При большом угле взаимного поворота кристаллитов (например, при росте пленок на аморфных подложках), дислокации на ГК, сблизившись, практически сливаются и теряют индивидуальность. Здесь, по-видимому, можно говорить об индивидуальности поверхности каждого кристаллита, образующего ГК, о чем свидетельствует высокая адсорбционная активность ГК, релаксационные явления на ГК, обуславливающие пики внутреннего трения и затухания ультразвука в поликристаллах, оптическая анизотропия металлических пленок.

Экспериментально подтверждено, что поверхность каждого кристаллита на ГК «шероховата» [7, 11]. Это так называемый рельеф «естественной шероховатости», который также обусловлен требованием минимальности свободной энергии. Шероховатости могут быть и причиной возникновения на ГК ПС.

Коль скоро в рассмотрение вводится понятие индивидуальности поверхности кристаллита на

ГК, в оптических явлениях мы должны учитывать особенности прохождения света через ГК, в частности, ее отражательную способность. Шероховатости на ГК и могут быть первопричиной их такой способности. Сказанное проиллюстрировано на *рис. 1*.



*Рис. 1* Поглощение плоскопараллельного пучка света, падающего под углом  $i$  к пленке, полученной в условиях падения молекулярного пучка перпендикулярно плоскости подложки.  $r$  – угол преломления;  $d$  – толщина пленки;  $\alpha$  – коэффициент поглощения света. Положено, что коэффициент преломления на ГК не претерпевает изменений.

Основной результат, следующий из *рис. 1* – это неоднородность в поглощении света объемом пленки, которую вносит ГК, из-за отражения на ней падающего света. Симметрия, которая имеет место при нормальном падении светового пучка, нарушается при освещении под углом к поверхности и ведет к образованию областей преимущественного поглощения света и тени. Это является одной из естественных причин возникновения в таких структурах АФН. Луч, проникающий в область тени через ГК, имеет интенсивность ниже интенсивности первичного луча, прошедшего в пленку.

### 3. ПРИМЕНЕНИЕ АФН - ПРИЕМНИКОВ

В оптоэлектронных устройствах на основе излучателя и приемника АФН-приемник используется как первичный преобразователь, преобразующий оптический сигнал в электрический. Получаемый при этом электрический сигнал в виде напряжения регистрируется или поступает в электронные схемы, осуществляющие его переработку и выделение из него параметра, несущего информацию об измеряемой величине. При этом преобразованный сигнал поступает на измерительный прибор, градуируемый в значениях измеряемой величины  $X$  [15].

Если рассмотреть математическую модель АФН-приемника, то он является функцией многих переменных: светового потока  $\Phi$ , спектрального состава оптического излучения  $L$ ;

температуры  $T$  и влажности  $B$ :

$$u_{\Phi} = f(\Phi, T, L, B) \quad (1)$$

$$u_{\text{ТМ}} = S_0(B, T) \sum_{k=0}^{\infty} \frac{a_k(x_1, x_2, \dots, x_m)}{\sqrt{1 + (k\omega\tau)^2}} \sin k\omega\tau \sum_{n=0}^{\infty} S_{\lambda_n} \Phi_{\lambda_n}(x_1, x_2, \dots, x_m), \quad (2)$$

где:  $a_k$  – относительная амплитуда  $k$ -й гармонической составляющей светового потока на входе АФН-приемника;  $\infty = 2\pi/T_0$  – круговая частота ( $T_0$  – период повторения входного сигнала);  $\tau$  – постоянная времени АФН-приемника;  $S_0$  – абсолютная чувствительность АФН-приемника к излучению с длиной волны  $\lambda_0$ ;  $S_{\lambda_n}$  – относительная чувствительность фотоприемника к излучению на длине волны  $\lambda_n$  (отношение к  $S_0$ );  $\Phi_{\lambda_n}$  – световой поток с длиной волны  $\lambda_n$ , поступающий на фотоприемник;  $x_1, x_2, \dots, x_m$  – всевозможные параметры, влияющие на величину светового потока и на его гармонический  $\sum a_k$  состав.

В целом, оптоэлектронные устройства с применением АФН-приемников можно использовать в контрольно-измерительной технике в качестве параметрического измерительного преобразователя неэлектрических величин, таких как плотность, влажность, координаты движущихся объектов, цвет, жирность молока и молочных продуктов, концентрация, уровень и т. д.

Одним из важных аспектов применения АФН-приемников является использование их в качестве ПОИ в волоконно-оптической связи.

Следует отметить, что применение АФН-приемников в качестве АПОИ открывает широкие возможности в разработке миниатюрных измерительных устройств для контроля различных физических параметров.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптоэлектронные первичные преобразователи с применением АФН-приёмников в качестве автономного ПОИ открывают широкие возможности в области разработки контрольно-измерительных устройств физико-химических параметров веществ и материалов, что целиком и полностью подтверждается имеющимся к настоящему времени значительным опытом применения АФН-приёмников в этом плане.

Расширение сфер и объёма применения АФН-приёмников для автоматизации производственных процессов связано с развитием технологии получения АФН-плёнок, совершенствованием их применения в качестве ПОИ, а также развитием метрологии и светотехники. В первую очередь здесь следует отметить применимость АФН-приёмников в ка-

честве координатно-чувствительного и двумерного координатно-чувствительного ПОИ для определения координат источника светового излучения в электронных и робототехнических устройствах.

Очень интересным и перспективным является применение АФН-приёмников в качестве автономного ПОИ для волоконно-оптической связи.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Фотоэлектрические явления в полупроводниках и оптоэлектроника / Под ред. Э.И. Адировича. – Ташкент: ФАН, 1972. С. 143–229
- [2] Starkirkiewics J., Sosnovski L., Simpson O. Photovoltaic effect exhibited in Highjresletance Semiconducting Films / Nature, 1946. Vol. 158, P. 28.
- [3] Берлага Р.Я., Руми М.А., Стрехов Л.П. «Возникновение» ЭДС при освещении сернисто-свинцовых фотосопротивлений / ЖТФ, 1954. Т. 24, в. 5. С. 943.
- [4] Scawade G. – Zs. für Naturforschung, 1955. Vol. 10. P. 78.
- [5] Piwkowski B.T. PbSe and PbTl infra red detectors / Acta Phys. Pol., 1956. Vol. 15, № 4. P. 271–274.
- [6] Мастов Э.М. Исследование аномального большого фотомагнитного эффекта в пленках теллурида кадмия: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1972. – 125 с.
- [7] Юабов Ю.М. Полупроводниковые пленки с аномально большим фотонапряжением: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1965. – 90 с.
- [8] Мирзамахмудов Т. Исследование АФН эффекта в полупроводниковых пленках с узкой запрещенной зоной: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1971. – 125 с.
- [9] Шакиров Н. Кинетика и характеристические времена АФН-эффекта в полупроводниковых пленках с микро  $p$ - $n$ -переходами: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1970. – 180 с.
- [10] Найманбаев Р. Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок теллурида кадмия и трехселенистой сурьмы и разработка на их основе оптоэлектронных приборов: дис. канд. физ.-мат. наук. – Ташкент, 1977. – 126 с.
- [11] Любин В.М., Федорова Г.А. Высоковольтные фото-ЭДС в слоях трехселенистой сурьмы / ФТТ, 1962. Т. 4, № 8. С. 2027–2030.
- [12] Найманбаев Р., Маманов О. Применение АФН-фотоприемников в качестве первичных преобразователей информации / УзФЖ, 1993. № 6. С. 30.
- [13] Эргашев Ж. Исследование фотоэлектрических свойств полупроводниковых пленочных структур с микро- $p$ - $n$ -переходами: дис. на соиск. уч. степ. канд. физ.-мат. наук. – Вильнюс, 1981. – 120 с.

- [14] Рахимов Н.Р. Исследование фотоэлектрических свойств АФН-пленок теллурида кадмия с серебром и разработка оптоэлектронных приборов на их основе: дис. канд. тех. наук. – Ташкент, 2001. 140 с.
- [15] Рахимов Н.Р, Ушаков О.К. Оптоэлектронные датчики на основе АФН-эффекта. – Новосибирск, 2010г 218 с.



**Неъматжон Рахимович Рахимов** - д.т.н., профессор кафедры Защиты информации, д.т.н, автор более 250 статей и 30 патентов, трех монографий, НГТУ.  
E-mail: [nerah@rambler.ru](mailto:nerah@rambler.ru)

## What does APV means?

Nematzhon RAKHIMOV

*Abstract:* This paper presents the results of researches of the effects of abnormally high photovoltaic voltage (APV) in the semiconductor film systems. The possibility of using of open channel optical couples for optoelectronic systems based on transmitter and APV-receiver was investigated. On the basis of APV-films new systems for various optoelectronic has been developed.

*Key words:* APV-films, optoelectronics, scientific information.

**VI. Дискуссии. Форум.  
К сведению авторов.**

### **Содержание раздела:**

- В.А. Жмудь. Теорема Котельникова-Найвиста-Шеннона, Принцип Неопределенности и Теория Относительности. Автоматика и программная инженерия 2014. №1 (7). С. 127–136. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия». Автоматика и программная инженерия 2014. №1 (7). С. 137–139.

# Теорема Котельникова-Найквиста-Шеннона, Принцип Неопределенности и Скорость света

В.А. Жмудь  
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск

**Аннотация:** В статье обсуждается проблема противоречия между некоторыми принятыми в науке положениями. А именно: а) теорема Котельникова утверждает, что интерполяция спектрально-ограниченной функции, заданной своими отсчетами, может быть при определенных условиях сделана сколь угодно точной; б) теория относительности утверждает, что никакая материальная частица не может двигаться быстрее, чем скорость света в вакууме, из чего следует спектральная ограниченность любой функции, описывающей траекторию любой материальной частицы; в) принцип неопределенности утверждает, что возможности такой интерполяции ограничены соотношением неопределенности, вследствие чего произведение ошибки координаты на ошибку времени является наперед заданной константой. Тем самым принцип неопределенности противоречит теории относительности. В статье предложено направление выхода из указанного противоречия.

**Ключевые слова:** Специальная теория относительности, Теорема Найквиста, Теорема Котельникова, Принцип неопределенности

## ВВЕДЕНИЕ

Теорема Котельникова, принцип неопределенности и предельный характер скорости света вступают в неразрешимое противоречие. Однако все эти достижения сосуществуют в науке.

Не сомневаясь в истинности теоремы Котельникова, как чисто математическом результате, мы должны, таким образом, решить вопрос, какую из оставшихся гипотез следует признать несостоятельной (или обе сразу)?

## 1. ТЕОРЕМА КОТЕЛЬНИКОВА (НАЙКВИСТА-ШЕННОНА)

В теории сигналов широко известна теорема Котельникова (в иностранной литературе также встречается название «теорема Найквиста-Шеннона» или «теорема Найквиста», «теорема отсчетов»).

Ее суть состоит в том, что непрерывный сигнал с ограниченным спектром можно **абсолютно точно** представить набором его отдельных значений («отсчетов»), следующих с равными интервалами, при условии, что частота следования этих отсчетов, как минимум, вдвое превышает верхнюю границу спектра указанного сигнала.

Введем термины. Верхняя (граничная) частота спектра сигнала  $f_B$  – это та частота, выше которой никаких компонент в спектре сигнала не содержится. Само значение этой частоты может содержаться в спектре, но с пренебрежимо малой амплитудой.

**Теорема Котельникова для АЦП:** на один период  $T_B$  верхней частотной границы  $f_B = 1 / T_B$  спектра преобразуемого сигнала должно приходиться не менее двух отсчетов АЦП. То есть частота квантования  $f_K$  должна, как минимум, вдвое превышать верхнюю частоту сигнала  $f_B$ :

$$f \geq f_B \Rightarrow S(f) = 0 \Rightarrow f_K \geq 2f_B. \quad (1)$$

В этой записи знаки неравенства должны быть **одинаковыми**, а именно, допустима и такая запись:

$$f > f_B \Rightarrow S(f) = 0 \Rightarrow f_K > 2f_B. \quad (2)$$

Если слева поставить знак «больше», а справа – «больше или равно», то получится неверное утверждение, включающее в себя, в частности, тезис о том, что гармонический сигнал частоты  $f_B$  можно якобы представить последовательностью отсчетов, идущих с частотой, соответствующей получению всего двух отсчетов на период. Ошибочность такого утверждения иллюстрирует *рис. 1*. Сама частота  $f_B$  не должна содержаться в сигнале, как следует из соотношения (1), либо частота  $2f_B$  не должна быть разрешена для значения  $f_K$ , как следует из соотношения (2), поскольку по двум отсчетам на период даже теоретически невозможно восстановить исходный гармонический сигнал. Действительно, если для гармонического сигнала  $u(t) = \sin 2\pi f_B t$  принять

$$f_K = 2f_B \Leftrightarrow t_i = t_0 + iT_K = t_0 + iT_B / 2, \quad (3)$$

то, в зависимости от  $t_0$  различные отсчеты значений будут иметь разные фазы:

$$u_i = u(t_i) = \sin[2\pi f_B(t_0 + i/2f_B)] = \sin(\phi_0 + i\pi), \quad (4)$$

где  $\phi_0 = 2\pi f_B t_0$ . Через эти точки можно провести бесконечное множество гармонических сигналов той же частоты, но различной амплитуды и фазы (см. рис. 1).

Требования, сформулированного теоремой Котельникова лишь *теоретически* достаточно для восстановления сигнала по оптимальному правилу и лишь применительно к идеализированному сигналу (с ограниченным спектром), который в природе не встречается.

Во-первых, конечный (ограниченный) спектр может характеризовать лишь бесконечный во времени сигнал. Во-вторых, само значение отсчетов должно быть взято с наивысшей точностью (идеально). В-третьих, на практике невозможна ситуация, чтобы при некоторой частоте квантования  $F_1$  сигнал можно восстановить идеально, а при частоте на любую сколь угодно малую величину  $\delta F$  больше эта задача была неразрешимой. Кроме того, процедура восстановления исходного сигнала по его отсчетам  $A_i$  никогда не бывает оптимальной. Поэтому на практике рекомендуется использовать заведомо большую частоту квантования по времени (частоту взятия отсчетов).

Например, если частота получения отсчетов равна  $f_K = 40 \text{ кГц}$ , то спектр входного сигнала теоретически не должен содержать компоненты с частотой более  $f_B = f_K / 2 = 20 \text{ кГц}$ .

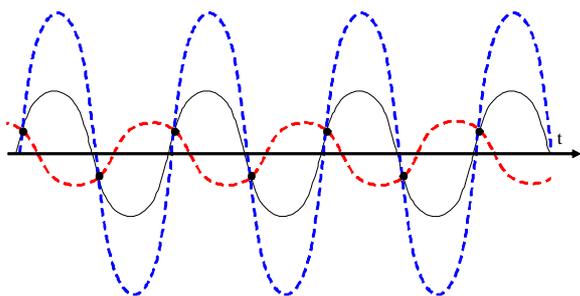


Рис. 1. Неоднозначность восстановления гармонического сигнала по двум отсчетам на период

Оптимальная процедура восстановления непрерывной функции по ее дискретным значениям состоит в аппроксимации сигнала суперпозицией функций вида  $u_i(t) = A_i \sin x/x$ , где  $x = 2\pi f_B(t - iT_K)$  (см. рис. 2, рис. 3). На практике чаще применяют процедуру кусочно-линейной интерполяции (рис. 4).

При кусочно-линейной аппроксимации существует ошибка, но она *ограничена по*

*величине*. Эта ошибка тем меньше, чем меньше шаг отсчетов. При аппроксимации с помощью гладких функций  $u_i(t)$  ошибка принципиально равна нулю. То есть кривая, показанная на рис. 3, если она рассчитана тем способом, о котором сказано выше, является точным восстановлением хода изначальной кривой, которая представлена только своими конечными значениями в точках дискретизации. Любая другая кривая, проходящая через эти же самые точки, будет характеризоваться более широким спектром, то есть не будет отвечать условиям ограниченного заданной частотой спектра. Такая кривая единственна. Это – самое важное утверждение Теоремы Котельникова, оно является математически доказанным утверждением, поэтому оспаривать его нельзя ни с позиции физики, ни с позиции какой-либо иной экспериментальной науки.

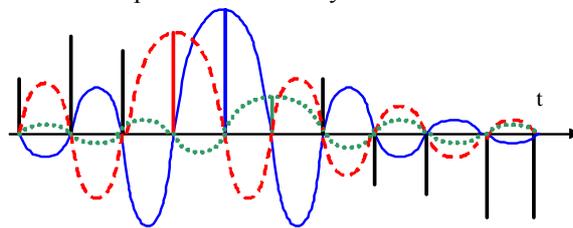


Рис. 2. Восстановление сигнала по отсчетам: вид аппроксимирующих функций

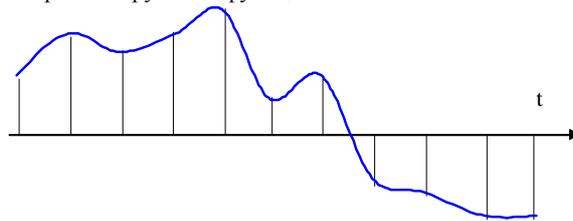


Рис. 3. Восстановление сигнала по отсчетам: результат восстановления в виде суммы функций, показанных на рис. 2

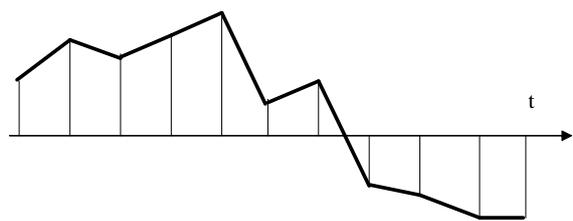


Рис. 4. Кусочно-линейная аппроксимация дискретного сигнала.

Формализовку Теоремы Котельникова позаимствуем из литературы [1–5]: «Произвольный сигнал, спектр которого не содержит частот выше  $f_B$ , Гц, **может быть полностью восстановлен**, если известны отсчётные значения этого сигнала, взятые через равные промежутки времени  $1/(2f_B)$ , с».

Итак, пусть имеется некоторая функция. Пусть имеются основания утверждать, что спектр этой функции ограничен. В этом случае можно утверждать на основе математики, что

если нам известны некоторые реперные значения этой, следующие с определенными интервалами, то значения этой функции между этими реперными значениями могут быть определены интерполяцией. Причем, при некоторых условиях, которые даны этой теоремой, ошибка интерполяции равна нулю. Естественно, что если эти условия соблюдаются приближенно, то ошибка будет приближенно равна нулю, то есть будет все же достаточно мала.

На рис. 5-а показан пример, когда известны два значения функции  $U(t)$ , достаточно удаленные друг от друга. При заданных значениях  $U_1$  и  $U_3$  промежуточное значение  $U_2$  может занимать, например, в том числе и любое из трех показанных положений:  $U_2^*$ ,  $U_2$  или  $U_2^{**}$ . Это возможно вследствие того, что

условия Теоремы Котельникова для показанного случая не соблюдаются: отсчеты взяты слишком редко, время между ними много больше, чем половина периода верхней частоты спектра.

На рис. 5-б показан другой случай, когда отсчеты взяты в соответствии с требованием Теоремы Котельникова. В этом случае единственным возможным положением промежуточной точки между отсчетами  $U_4$  и  $U_6$  является значение  $U_5$ , все остальные положения невозможны, поскольку они не лежат на линии, соединяющей эти точки. Гипотезу о том, что значение этой функции может, например, соответствовать точке  $U_5^*$  или  $U_5^{**}$  следует отвергнуть как несостоятельную.

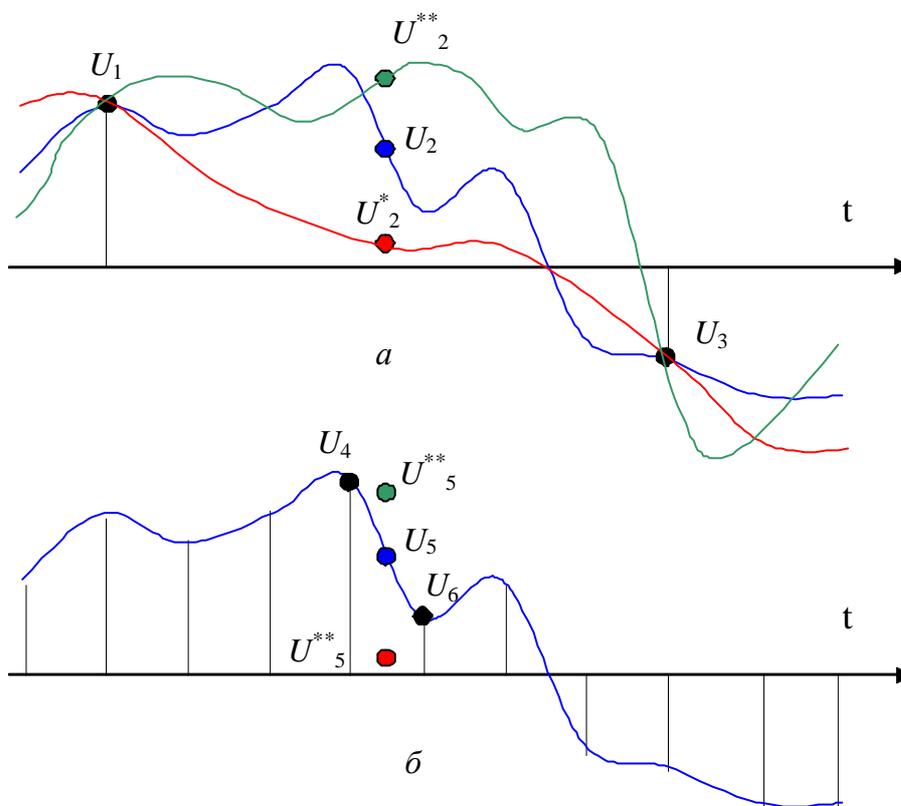


Рис. 5. Указание на промежуточное значение сигнала на основе сведений о его значении в фиксированных точках: а – при большом интервале между точками указание может содержать большую ошибку; б – при уменьшении интервала между точками ошибка указания должна снижаться

## 2. ПРИНЦИП НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ГЕЙЗЕНБЕРГА

Напомню Принцип неопределенности Гейзенберга [6–8]. Экспериментальные исследования свойств микрочастиц (атомов, электронов, ядер, фотонов и др.) показали, что точность определения их динамических переменных (координат, кинетической энергии, импульсов и т. п.) ограничена и регулируется принципом неопределенности. Согласно этому принципу динамические переменные, характеризующие систему, могут быть разделены на две (взаимно дополнительные)

группы:

- 1) временные и пространственные координаты ( $t$  и  $q$ );
- 2) импульсы и энергия ( $p$  и  $E$ ).

При этом невозможно определить одновременно переменные из разных групп с любой желаемой степенью точности (например, координаты и импульсы, время и энергию). Это связано не с ограниченной разрешающей способностью приборов и техники эксперимента, а отражает фундаментальный закон природы. Его математическая формулировка дается соотношениями:

$$dq \cdot dp \approx h / 2 \pi, \quad (5)$$

$$dE \cdot dt \approx h / 2 \pi, \quad (6)$$

где  $dq$ ,  $dp$ ,  $dE$ ,  $dt$  - неопределенности (погрешности) измерения координаты, импульса, энергии и времени, соответственно;  $h$  - постоянная Планка.

Это означает, например, что если мы зададим какое-то фиксированное значение энергии частицы, то мы не сможем указать с достаточной точностью тот момент времени, когда эта частица обладает этой энергией. Также если мы зададим импульс частицы, то мы не сможем указать с достаточной точностью положение частицы, при котором она обладает этим импульсом.

В классической (неквантовой, нерелятивистской) физике понятия энергии, импульса тесно связаны с движением частицы, также как и понятия положения и времени.

С позиции этой классической физики частица существует непрерывно во времени. Следовательно, она непрерывно во времени и движется. Из этого следует, что в каждый момент времени частица где-то находится, обладает какими-то параметрами движения, то есть скоростью, ускорением, координатами в пространстве. Все эти функции можно описать в терминах функций времени. А именно: если положение задать в трехмерном пространстве вектором  $S(t)$ , соединяющим начало координат с координатой центра этой частицы  $[X(t), Y(t), Z(t)]$ , то первая производная этой функции по времени даст вектор скорости  $V(t)$ , а вторая производная даст вектор ускорения  $A(t)$ .

Если скорость этой частицы по величине имеет ограниченное значение (длина вектора ограничена), например,  $V < C$ , то наперед заданное время  $\Delta t$  перемещение не может превысить величину произведения этой скорости на этот интервал времени:  $\Delta S < C \cdot \Delta t$ .

Тем не менее, если в соотношении (6) ошибку (неопределенность) по времени устремить к нулю, то ошибка (неопределенность) по энергии устремится к бесконечности.

Если траектория частицы – непрерывная функция времени, то такое утверждение не может относиться к фактическому движению частицы. Оно может быть справедливо, например, по отношению к нашим суждениям о характере движения частицы, но никак не может быть связано с истинным движением частицы. Или следует предположить, что движение частицы не подчиняется правилам, установленным для непрерывных функций времени, то есть указанные ограничения не имеют места.

Откуда же берутся эти ограничения? Они следуют, например, из теории относительности, в частности – из постулата о невозможности каким-либо физическим телом развивать

скорость равную или больше, чем скорость света в вакууме. Разумеется, любая элементарная частица должна подпадать под этот постулат, либо если это не так, то следует признать этот постулат ошибочным.

Впрочем, признание, например, этого постулата ошибочным, никак не гарантирует, что принцип неопределенности, сформулированный в соотношениях (5) и (6) безошибочен, также как признание, например, ошибочными соотношения (5) и (6) никак не доказывают безошибочности постулата о предельном характере скорости света в вакууме для любых физических частиц.

Важно лишь признать, что оба эти постулата не могут быть одновременно безошибочными, если мы признаем справедливость теоремы Котельникова, а справедливость этой теоремы не может быть подвергнута сомнению, поскольку она не является результатом экспериментальных исследований, а доказана чисто теоретически, является достоянием математики, а не только узкой области естествознания (физики).

### 3. ПРИНЦИП ОГРАНИЧЕННОЙ СКОРОСТИ ДЛЯ ЛЮБОГО ФИЗИЧЕСКОГО ОБЪЕКТА

Указанный принцип связан с постулатом Специальной теории относительности (СТО) Эйнштейна [9–11]. Специальная теория относительности утверждает, что никакие материальные объекты не могут иметь скорость, превышающую скорость света в вакууме  $C$ . Для частиц с нулевой массой, каковым, например, назван фотон, допускается равенство их скорости этой величине, но не превышение этой величины.

История принятия этого утверждения связана с тем, что в определенных соотношениях в знаменателе имеет место множитель, который обращается в нуль, если скорость объекта равна скорости света в вакууме. Поэтому Эйнштейн на некотором этапе своих исследований писал, что случаи равенства скорости объекта скорости света в вакууме он не рассматривает, поскольку в этом случае обсуждаемые соотношения теряют всякий смысл. Впоследствии он стал называть эти случаи «запрещенными», вкладывая в этот термин тот смысл, что эти случаи не охватываются излагаемой теорией, то есть запрещены к обсуждению в данной теории (но не запрещены как таковые). Далее терминология видоизменялась, также как и некоторые положения СТО, вследствие чего понятие «запрещенные скорости» стало трактоваться именно в том смысле, что теория не допускает возможности существования таких скоростей, не просто не рассматривает такие скорости, но запрещает их принципиально.

Убедительность данного тезиса может быть

поставлена под сомнение. Соотношение «ноль разделить на ноль» отнюдь не лишено смысла, особенно, когда речь идет не о математической величине, а о физической величине, которая может изменяться плавно, в том числе и достигая нулевого значения. Кроме того, что некоторые неопределенности в математике принято «раскрывать», можно указать, что величина, которая стоит справа в знаменателе и поэтому создает трудность ее трактовки, могла бы стоять слева в числителе, и не создавать никаких трудностей вообще.

Рассмотрим классическое соотношение из Первого закона Ньютона – сила равна произведению массы на ускорение:

$$F = ma. \quad (7)$$

Это соотношение позволяет рассчитать любую величину по двум другим. Например, зная массу и ускорение, мы можем рассчитать силу, зная силу и массу, можем рассчитать ускорение, зная силу и ускорение, можем рассчитать массу.

В частности, справедливо:

$$a = \frac{F}{m}. \quad (8)$$

Пусть экспериментально установлено, что указанное соотношение при релятивистских скоростях (то есть при скоростях, близких к скорости света в вакууме) приобретает некоторый поправочный множитель:

$$a = \frac{F}{m/\beta}. \quad (9)$$

Если при некоторых условиях  $\beta \rightarrow 0$ , то  $m/\beta \rightarrow \infty$ , из чего следует, что  $a \rightarrow 0$ .

Данные утверждения могут быть получены, например, экспериментально, путем измерения движения различных частиц в поле при разных условиях, влияющих на множитель  $\beta$ , с последующим вычислением ускорения как функции  $\beta$  в (9).

Указанные математические соотношения могут далее трактоваться следующим образом: параметр  $\beta$  влияет на массу частицы, то есть он является поправочным коэффициентом к массе частицы. Следовательно, массу частицы надо определить по-новому:  $m_\beta = m/\beta$ .

Следовательно, если принять  $\beta = 0$ , то придется принять и утверждение, что новая масса с поправкой равна бесконечности:  $m_\beta = m/\beta = \infty$ . В реальном мире ничто не может быть строго равным бесконечности,

поэтому мы стоим перед выбором – либо запретить ситуацию, когда  $\beta = 0$ , либо признать, что реальный физический объект (например, элементарная частица) может обладать бесконечной массой. Такой объект вследствие гравитационных сил, пропорциональных массе, был бы источником бесконечных сил, направленных к его центру и приложенных ко всем объектам, обладающим массой. Следовательно, при возникновении такого объекта материя во всей Вселенной должна была бы устремиться к этому объекту, образовалась бы гигантская и единственная «черная дыра», то есть вся материя сосредоточилась бы в одной точке.

Мы не будем осуждать физиков за то, что они такую ситуацию не признали возможной, то есть при таком подходе запрет на то, чтобы параметр  $\beta$  принял нулевое значение, равнозначен запрету схлопывания нашего мира в одну точку.

Но соотношение (9) можно записать и другим путем, что не исключает его справедливость:

$$a = \frac{F\beta}{m}. \quad (10)$$

Далее можно сказать, что целесообразно оперировать не чистой силой  $F$ , а уточненным понятием силы  $F_\beta = F\beta$ .

Это могло бы трактоваться следующим образом: параметр  $\beta$  влияет на силу, воздействующую полем на частицу, то есть является поправочным коэффициентом к силе. Если этот параметр принимает нулевое значение, то сила воздействия поля на данную частицу равна нулю.

Не возникает никаких бесконечных масс.

Мы могли бы даже принять отрицательное значение параметра  $\beta$  без какого-либо нарушения общности закона, выраженного соотношением (10). Действительно, если параметр  $\beta$  принимает отрицательное значение, то в этой трактовке такая ситуация означала бы лишь то, что в этом случае поле воздействует на частицу с силой, направленной в противоположном направлении по сравнению с той ситуацией, когда этот параметр был примерно равен единице.

Наступила очередь рассмотреть значение этого параметра. Пусть, например, этот параметр определяется следующим образом:

$$\beta = \sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}. \quad (11)$$

В предложенной трактовке можно сказать,

что если частица движется в поле со скоростью, равной скорости света (в вакууме), то поле перестает оказывать силовое воздействие на эту частицу. Никакого увеличения массы до бесконечного значения при этом не требуется и не происходит. Невозможность с помощью поля придать ускорение частице является не следствием бесконечно большой массы частицы, а является следствием бесконечно малого воздействия этого поля на эту частицу. Это логично: полевое воздействие не может ускорить частицу, поскольку поле движется с той же скоростью, что и частица. Так ветер может ускорить только тот лист, который движется медленнее, чем ветер. Если лист движется со скоростью ветра, то ветер уже не ускоряет лист. Если же лист движется со скоростью быстрее, чем ветер, то ветер будет замедлять лист, поскольку он будет стараться придать листу ровно ту скорость, с которой движется воздух вокруг листа.

Если бы мы могли придать ускорение листу только с помощью ветра, мы могли бы вывести закон (постулат) о запрете для листа от любого дерева двигаться со скоростью, превышающей скорость ветра.

Однако технический прогресс позволил нам поместить лист на автомобиль, движущийся со скоростью, намного превышающей скорость ветра, но в том же направлении, куда дует ветер. Ветер в этом случае будет не ускорять такой лист, а тормозить, лист будет сдуть не по ходу автомобиля, а против его хода, хотя изначально ветер дует в том же направлении, в котором движется автомобиль.

Таким образом, можно показать, что внесение поправочного коэффициента в (10) не только логично, но и снимает ряд проблем СТО. В результате снимается необходимость запрета нулевых и отрицательных значений коэффициента  $\beta$ , все уравнения обретают смысл не только при  $\beta > 0$ , но и при  $\beta = 0$ , а также при  $\beta < 0$ .

Допущение возможности элементарной частицей двигаться со скоростью больше, чем скорость света дает следующие преимущества для новой теоретической физики:

1. Возможность классического некантового подхода к поиску модели движения электрона в атоме [13–14] при котором дается ответ на вопрос о постоянстве стационарной траектории электрона и отсутствии излучения.

2. Возможность объяснения природы светового излучения атома в вакууме, например, при переходе электрона с одного энергетического уровня на другой, путем аналогии с эффектом Черенкова.

3. Объяснение физической сущности эффекта Черенкова: при движении электрона со скоростью, большей, чем скорость света (в данной среде), поле тормозит электрон, а при

движении с меньшей скоростью поле ускоряет электрон, поэтому электрон изменяет свою скорость на скорость, строго равную скорости света (в данной среде), это изменение происходит колебательно. Указанные колебания скорости происходят с высокой частотой и порождают излучение волны – естественное следствие высокочастотного колебания заряженной частицы.

Таким образом, можно указать, что скорость света в вакууме не обязательно является предельной скоростью для любой физической частицы.

Мы рассмотрели этот вопрос всесторонне – не только с позиции признания Постулата об ограниченности скорости света, но и с позиции его непризнания.

И все же следует скорее предположить, что скорость любой материальной частицы, движущейся под действием всех видов сил (которые, как известно, распространяются с ограниченной скоростью, а именно – со скоростью света в вакууме) остается ограниченной величиной. Мы в данном случае не ссылаемся на сведения из Специальной теории относительности как доказанный факт или постулат, а всего лишь руководствуемся тем соображением, что соотношение (9) остается в силе даже если его записать в виде (10), то есть возможности электрических и электромагнитных полей придать ускорение заряженной частице весьма ограничены.

Мы не утверждаем, что скорость частицы не может превысить скорость света (в вакууме), но мы предполагаем, что даже если она может ее превысить, то ненадолго и (или) ненадолго.

Из сказанного мы извлечем следующий вывод: **скорость любой материальной частицы ограничена**, согласно теории относительности она ограничена величиной скорости света в вакууме, по другим предположениям это ограничение может быть некоторым образом в некоторых случаях преодолено, но все же эта величина остается ограниченной в разумных пределах вследствие ограниченности распространения силы, которая ответственна за изменения скорости движения заряженных частиц.

Движение незаряженных частиц мы не рассматриваем, поскольку область движения незаряженных частиц ненулевой массы с релятивистскими скоростями крайне трудно исследуется экспериментально.

Например, говоря об электроне, в любом случае необходимо согласиться, что **реальная скорость электрона остается ограниченной**, а какой величиной, это уже вопрос второй.

**Реальная скорость всякого материального тела и частицы непременно должна быть ограничена**, поскольку ограничена ее кинетическая энергия. В связи с ограниченной потенциальной энергией сторонних сил и полей, можно утверждать, что

и ускорение частиц – также ограниченная величина. Поскольку траектория – гладкая функция, то все производные этой величины по времени (скорость, ускорение, темп изменения ускорения и так далее) также ограничены.

То есть *траектория любой материальной частицы характеризуется ограниченным спектром колебаний в пространстве* (если хотите - в пространстве-времени).

#### 4. СУТЬ ПРОТИВОРЕЧИЯ

В рассмотренном случае, согласно Теореме Котельникова, эта функция с ограниченным спектром может быть представлена счетным количеством ее отсчетов, взятых с частотой, не реже половины частоты, соответствующей границе спектра. Если отсчеты даже взяты с некоторой погрешностью, то и промежуточные значения могут быть восстановлены с погрешностью не более чем полученные отсчеты. Из этого следует, что если мы знаем с некоторой погрешностью значения положения (скорости, ускорения) частицы во времени, то дробление этой шкалы может быть осуществлено сколь угодно более мелко, и промежуточные значения исследуемой величины могут быть вычислены из предположения об ограниченном спектре этой временной функции. Таким образом, *уточнение времени не ведет к увеличению погрешности координаты*. Под *обобщенной координатой* мы также можем понимать энергию или импульс. То есть произведение погрешности определения времени на погрешность определения обобщенной координаты не является константой, а уменьшается с уменьшением шага временного квантования.

Особо подчеркну, что принцип неопределенности – это *соотношение, полученное экспериментально*.

Следует четко разграничить реальную величину и реальные результаты ее измерения.

Усреднение любой стационарной случайной величины во времени снижает ее дисперсию. Поэтому усреднение любого измерения стационарной величины повышает точность (до определенных пределов). Имеет место и обратная зависимость: сокращение времени измерения повышает дисперсию результата. Это относится к аппаратной и методической погрешности измерения, но возрастание погрешности измерения никак не может доказать увеличение дисперсии собственно случайной величины. Просто *на меньшем интервале времени мы можем получить худшую точность*.

Это понятно даже на бытовом уровне: чтобы взвесить что-либо надо, чтобы чашка весов успокоилась, перестала колебаться.

При измерении частоты погрешность частотомера аналогично снижается с ростом измерительного интервала, и возрастает с его уменьшением. Это в некоторых случаях может,

конечно, означать, что измеряемая частота обладает соответствующей фазовой девиацией. Но, хотя теоретически рост погрешности может возрасти до бесконечности при уменьшении измерительного интервала, мы не можем допустить даже теоретически, что рост фазовых шумов характеризуется такой же зависимостью. Следовательно, *начиная с некоторых значений длительности измерительного интервала, рост дисперсии результата измерения следует отнести не к свойствам сигнала, а к свойствам метода измерения*.

Это представление следует, видимо, применить и к исследованиям элементарных частиц и к иным измерениям.

*Экспериментально наблюдаемый рост девиации результата* выявляет свойства измерительных устройств инструментальной погрешности измерителя (так называемых наблюдателей), и *не имеет отношения к реальным траекториям реальных частиц*.

В теории не должно быть места произвольному виду траектории. В теоретической механике элементарных частиц, если исходные условия задачи сформулированы в терминах известных начальных условий и закономерностей, то и решения должны быть сформулированы не в вероятностных значениях, а в конкретных реализациях, рассчитываемых с заданной точностью, которая следует из точности задания начальных условий. Если же начальные условия известны по вероятности (в частности, в результате измерения), то и траектории имеют право быть рассчитанными или измеренными с соответствующей неопределенностью.

Иными словами, экспериментальная задача имеет право и должна подчиняться принципу неопределенности в том смысле, что известная погрешность для указанного произведения не может быть снижена теоретическим расчетом для связанных с эти расчетных предыдущих и последующих величин. Однако, *начиная с некоторых значений, она не может возрастать* согласно результату, полученному теоремой Котельникова.

Например, начиная с некоторого интервала времени, действует экспериментальное ограничение: чем меньше измерительный интервал, тем выше ошибка измерения. Это правило действует на интервале, ограниченном как сверху, так и снизу, например, на интервале от  $T_1$  до  $T_2$ .

Если измерительный интервал менее чем  $T_1$ , то ошибка измерения не должна продолжать расти неограниченно обратно пропорционально этому интервалу, иначе мы приходим к парадоксальному следствию, что ошибка на интервале, сколь угодно малом, может принять величину, сколь угодно большу.

Если измерительный интервал больше, чем  $T_2$ , то указанное соотношение тоже не должно продолжать действовать неограниченно, иначе

мы приходим к другому парадоксальному средствию: ошибка может быть снижена до сколь угодно малой величины за счет сколь угодно большого увеличения времени измерения.

Отсюда следует, что соотношения (5) и (6) справедливы лишь в ограниченном с обеих сторон интервале величины  $dt$ . По-видимому, эта ограниченность распространяется и на остальные неопределенности, а именно: на  $dq$ ,  $dE$ ,  $dp$ .

Во всяком случае, должно быть очевидно, что невозможно снизить неопределенность любой из величин до сколь угодно малой величины за счет простого увеличения неопределенности другой величины, связанной с ней.

Например, если энергию считать квантованной величиной, то невозможно даже теоретически снизить неопределенность определения энергии ниже, чем величина кванта этой энергии. Уже хот я бы из этого следует, что соотношение (6) при некоторых достаточно больших  $dt$  должно нарушаться. Поскольку импульс связан с энергией, такое же утверждение можно сформулировать в отношении (5).

## 5. ВЫХОД ИЗ ПРОТИВОРЕЧИЯ

Следует, по меньшей мере, отнести соотношения (5) и (6) лишь к ограниченному диапазону значений (как сверху, так и снизу) и признать, что это связано не с природой измеряемых величин, а с природой методов измерений.

Иными словами, соотношение неопределенности не может быть присущим природе вещей, реальным материальным объектам, оно может лишь относиться к методам получения сведений о природе с помощью метрологических устройств, обладающих рядом ограничений.

Поскольку световые поля и электромагнитные поля – это в настоящее время самые быстрые из известных полей, способных передавать информацию (или силовое воздействие), то никакая физическая установка не может позволить ни в каком эксперименте получать сведения о процессе быстрее, чем со скоростью света (равной скорости распространения электромагнитного поля в вакууме). Следовательно, как минимум, по этой причине, любой измерительный прибор ограничен в точности и искажает результат измерения. Это и является причиной экспериментально наблюдаемого выполнения в некоторых рамках соотношений (5) и (6), то есть обосновывает принцип неопределенности как данность, выявленную в эксперименте. Эта данность не имеет ничего общего с реальными событиями и процессами мира элементарных частиц (и любой другой задачи).

Теоретическая же задача, допускающая в принципе сколь угодно точное знание начальных условий, не должна подчиняться этому принципу, то есть указание исходных параметров движения в допущении пренебрежимо малых погрешностей должно давать возможность не только статистического анализа, но также и детерминированного расчета.

Например, в теоретической механике в ее классическом виде мы говорим, что в отсутствие сил сопротивления тело может сохранять свое равномерное и прямолинейное движение сколь угодно долго. На практике мы всегда видим, что каким бы ни был скользким лед, шайба всегда останавливается. Это не дает оснований утверждать, что теория не верна. Просто невозможно обеспечить нулевое трение. Точно также невозможно обеспечить нулевую аппаратную погрешность при измерении и в каком-то смысле имеет место соотношение неопределенности (5), (6).

Но только в каком-то смысле и как результат неопределенности данного метода измерения.

В частности, пусть на интервале  $t_1$  мы знаем, что элементарная частица имела координату  $x_1$ , импульс  $p_1$ , и энергию  $E_1$ , и эти величины мы знали с погрешностями, соответственно,  $dt$ ,  $dx$ ,  $dp$ ,  $dE$ . Тогда, выбирая интервал  $t_2 = t_1/N$ , который находится внутри интервала  $t_1$ , мы не можем при произвольном значении  $N$  получить сохранение соотношений (6). В самом деле: устремим  $N$  к бесконечности. Следовательно,  $t_2$  будет стремиться к нулю. Для того чтобы соотношение (6) продолжало выполняться, необходимо, чтобы  $dE$  возрастало до бесконечности. Разумеется, такого просто не может быть: любая частица обладает конечной энергией.

Аналогично если мы знаем, что электрон потерял свой импульс (например, вдвое) на какой-либо траектории, то даже если мы эту величину знаем со значительной погрешностью, можно определенно утверждать, что среднее значение между этими двумя значениями электрон имел где-то на промежуточной точке этой траектории. Мы можем сколь угодно точно задать это среднее значение. Разумеется, в какой-то момент времени электрон обладал именно этим значением. Значит, мы можем теоретически назвать значение импульса с нулевой погрешностью. Для того чтобы соотношение (5) выполнялось, необходимо, чтобы отклонение электрона от указанной траектории возрастало до бесконечности. Получается довольно странная картина: электрон, зарегистрированный, допустим, в лаборатории Новосибирска, должен настолько сильно отклониться на более маленьком интервале, что он должен был бы слетать на расстояние, равное расстоянию до Москвы. А на еще меньшем интервале он, соответственно,

должен слетать до расстояния, равном расстоянию до Луны, на еще меньшем – до Солнца, а на еще меньшем – и до Сириуса?

Оппоненты могут возразить, что если энергия в момент  $t_1$  равна  $e_1$ , а в момент  $t_0$  была равна  $e_0$ , то она вовсе не должна проходить все промежуточные значения. Есть теория, в соответствии с которой она меняется скачком, как показано Планком и Эйнштейном.

Можно было бы согласиться, что энергия – это не непрерывная величина, а дискретная. Тогда, рассуждая логически, мы легко можем доказать, что и пространство состоит из дискретных величин, и время протекает не непрерывно, а дискретно, и все явления в природе – это не череда постепенных плавных изменений, а последовательность дискретных состояний.

У такого представления есть два очевидных минуса, не говоря уже о том, что античный схоласт Зенон уже высказывал эту мысль, но наука ее многократно опровергала.

1. Если величина дискреты не может быть измерена в силу ее большой малости, то не имеет смысла говорить о дискретности, а проще говорить о непрерывной величине. Круг тоже можно представить совокупностью прямых отрезков, но бесконечное уменьшение длин этих отрезков с одновременным увеличением их количества даёт иную картину – многоугольник переходит в круг как предельное значение принятой абстракции. Весь математический аппарат кривых дифференцируемых плавных функций построен на этом. И если мы представим движение как последовательную смену движений с постоянными скоростями, то мы получим бесконечное ускорение на границах интервалов. Жизнь нас неоднократно убеждает, что теоретическая картина мира с ограниченной энергией взаимодействия больше соответствует истине, чем представления с бесконечными энергиями.

2. Если величина дискреты может быть взята произвольной, то необходимо говорить уже не о дискрете, а о плавной функции. Спектры излучений атомов, ионов и молекул убеждают нас, что энергия – это плавно меняющаяся функция. Доплеровское уширение спектров и ряд других известных явлений не могли бы иметь места, если бы энергия менялась дискретно с фиксированным и неизменным шагом для всех случаев взаимодействий. Однако известно, что энергия кванта – это переменная величина. Таким образом, говорить о дискретности энергии в принципе не остается возможности.

3. Если бы энергия была строго квантованной величиной по своей сути, то разница энергетических уровней во всех атомах и во всех молекулах была бы равна этой величине, и никакой другой. Каждый атом и каждая молекула могли бы излучать энергию лишь равную одному кванту, двум квантам,

трем и так далее – целому числу квантов. Соответственно, свет в этом случае обладал бы только кратными значениями частот:  $\nu_0, 2\nu_0, 3\nu_0 \dots N\nu_0$ . Вместе с тем это далеко не так.

4. Если почему-либо не выполнялся бы п.3, то есть если бы существовали причины того, что в каждом типе атома и в каждом типе молекулы вещества величина кванта имеет свое индивидуальное значение, то это могло бы объяснить индивидуальные спектральные свойства атомов и молекул, то есть, почему свет, излученный атомом натрия, отличается от света, излученного атомом магния. Но в этом случае, во-первых, каждый атом имел бы не спектр излучения, а единственную спектральную линию, а во-вторых, свет, излученный одним атомом, мог бы быть поглощен лишь другим атомом того же вещества: излучение магния могло бы быть поглощено лишь атомом магния, а излучение натрия – лишь атомом натрия, и так далее.

## ЛИТЕРАТУРА

### *О Котельникове и о его теореме:*

- [1] <http://www.biograph.comstar.ru/bank/kotelnik.htm>
- [2] <http://compmus9.valuehost.ru/galglory/koteln3.htm>
- [3] Баскаков С.И., Радиотехнические цепи и сигналы стр.117.
- [4] <http://grigam.narod.ru/inform/inf6.htm>
- [5] [http://graphics.cs.msu.su/courses/cg\\_el00/kotelnikov.pdf](http://graphics.cs.msu.su/courses/cg_el00/kotelnikov.pdf)

### *Принцип неопределенности:*

- [6] <http://nuclphys.sinp.msu.ru/spargalka/new/a02.htm>
- [7] [http://www.chemistry.ssu.samara.ru/chem1/22\\_geiz.htm](http://www.chemistry.ssu.samara.ru/chem1/22_geiz.htm)
- [8] <http://psylib.ukrweb.net/books/hokin01/txt04.htm>

### *Предельный характер скорости света:*

- [9] Румер Ю.Б., Рывкин М.С. Теория относительности. М., Учпедгиз, 1960. - 212 с.
- [10] Эйнштейн А. Собр. соч., в 4-х т., М., Наука. - 1965. - т.1.
- [11] Бриллюэн Л. Новый взгляд на теорию относительности. М.: Мир. - 1972. - 142 с.

### *Дискуссии на стыке наук:*

- [12] В.А. Жмудь. Теорема Котельникова, Принцип Неопределенности и Предельный характер скорости света. [http://samlib.ru/z/zhmudx\\_w\\_a/teorema.shtml](http://samlib.ru/z/zhmudx_w_a/teorema.shtml)
- [13] The modeling of the electron movements inside the atom on the base of the non-quantum physics Zhmud, V.A., Bugrov, S.V. 2009 Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009.
- [14] Жмудь В.А. Обоснование нерелятивистского неквантового подхода к моделированию движения электрона в атоме водорода // Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2009. 3(57). С. 141 – 156.



**Вадим Аркадьевич Жмуд** – заведующий кафедрой Автоматики НИГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 200 научных статей, включая 10 патентов и 6 учебных пособий. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.  
E-mail: [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@bk.ru)

### **Nyquist-Shannon and Kotelnikov Theorem, the Uncertainty Principle, and the Speed of Light**

Vadim ZHMUD

*Abstract:* The paper discusses the problem of contradiction between some science theseses. Namely: a) Nyquist theorem states that the

interpolation of spectral limited function can be given with their samples under certain conditions arbitrarily accurately; b) Theory of relativity states that no material particle can move faster than the speed of light in vacuum, which implies limitation of any spectral function describing the trajectory of any material particle; c) the Uncertainty Principle asserts that the possibility of such interpolation is limited by the Uncertainty Principle, whereby the product of the coordinates error to run-time error is preassigned constant. Thus the Uncertainty Principle contradicts the Theory of relativity. The article suggested the possible direction of the resolving of this contradiction.

*Key words:* Special Relativism Theory, Nyquist Theorim, Kotelnikov Theorem, Uncertainty Principle

# Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия»

## ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА

Автоматика, робототехника, автоматизированные системы, программные системы и средства (программная инженерия), защита информации, сетевые технологии, Национальная программная платформа (НПП), облачные технологии, инновации, информационные технологии, моделирование систем, свободное и открытое программное обеспечение.

## ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ ЖУРНАЛА

Научные, педагогические и инженерные кадры, аспиранты, докторанты и студенты, представители бизнеса в области информационных технологий и автоматике.

## ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

К опубликованию принимаются оригинальные научные статьи, ранее не опубликованные ни в каких средствах информации, включая научные и иные журналы и электронные сайты.

Не допускается дословное цитирование без кавычек из чужих источников (плагиат) и из своих источников (автоплагиат), допускается опубликование ранее опубликованных иллюстраций и уравнений, если это требуется для понимания текста. Иллюстрации из чужих источников должны быть снабжены ссылками на эти источники.

Статья должна содержать новые научные результаты и соответствовать тематике журнала.

Иллюстрации – черно-белые или цветные (предпочтительно).

Статья обязательно должна содержать аннотацию и ключевые слова, литературные ссылки, необходимые для понимания статьи и/или с указанием источников цитирования.

Присланные статьи подвергаются внутреннему анонимному рецензированию. Редакционная коллегия вправе отклонить статью от опубликования с указанием причин этого отклонения или предложить доработать статью по замечаниям рецензента.

Ответственность за отсутствие плагиата, за научное содержание статей и за качество перевода на английский язык лежит на авторе (авторах) публикации.

Российские авторы должны присылать перед окончательным опубликованием статьи скан-

файл **экспертного заключения** о возможности **открытого опубликования** статьи в ее окончательном виде. Бумажный вариант досылается позже.

Все вопросы по опубликованию можно уточнить по электронной почте.

Статьи, написанные в соавторстве действительных членов РАН или РАЕН, а также статьи, сопровождающиеся положительной рецензией действительных членов РАН или РАЕН (твердая копия с оригинальной подписью, заверенной по месту работы, пересылается по почте), могут быть опубликованы по ускоренной процедуре рецензирования. При этом не исключается предложение редакции о редакторской правке и/или о лучшем качестве иллюстративного материала.

## ЯЗЫК ПУБЛИКАЦИИ

Научный журнал Автоматика и программная инженерия (АиПИ) издается на двух языках: русском и английском. Английская версия журнала выходит позже. Авторам предлагается присылать на адрес заместителя главного редактора [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru) свои статьи для публикации в формате Word-2003 на двух языках. Допускается присылать статьи на одном языке (русском или английском) с обязательным предоставлением окончательной версии статьи на двух языках, или, по меньшей мере, с предоставлением названия, сведений об авторах, аннотации и ключевых слов на обоих языках. Подписи на иллюстрациях также должны делаться на двух языках, или только на английском (в этом случае в русскоязычном варианте статьи в подрисовочных подписях следует давать перевод этих подписей).

В случае предоставления авторами статьи только на одном языке, **опубликование на другом языке не гарантируется**. В этом случае по усмотрению редакции может быть опубликовано только краткие сведения (аннотация, ключевые слова, тезисы) или статья в сокращенном виде.

Сопровождение русскоязычной статьи английским переводом названия, ключевых слов и аннотации и транслитерации фамилий авторов редакцией приветствуется: в этом случае указанные сведения помещаются в конце статьи.

Желательно указание индекса УДК и (или) МКИ.

Допускается прием к опубликованию статей только на английском языке для англоязычных авторов. В этом случае по усмотрению редакции либо англоязычная версия публикуется в русскоязычной и англоязычной версии журнала, либо редакция осуществляет самостоятельный перевод статьи на русский язык для русскоязычной версии.

#### ФОРМАТИРОВАНИЕ ТЕКСТА

Мы настоятельно просим присылать статьи в формате Word (\*.doc), а также во избежание искажений формул и рисунков (для контроля) – копии статей в формате \*.pdf.

Просим вас использовать формат страницы: А4, книжный, текст в две колонки, шрифт Times New Roman, стиль «обычный», размер 10 пт, через один интервал, заголовок – в одну колонку шрифт 24 пт, литература – 8 пт или 9 пт. Поля на странице: левое 3 см, правое 2 см, верхнее и нижнее – 2 см, нумерацию страниц не делать. Информация об авторах – в конце статьи, желательна цветная фотография (портрет), шириной не более 3 см, высотой не более 4 см., необходимо указывать адрес электронной почты всех авторов, если некоторые из авторов не имеют электронной почты, следует указывать тот, который желателен для переписки. В перечне авторов на первой странице указываются только фамилии, И.О. и место работы, город, для иностранных авторов также страна проживания.

#### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Редакционная коллегия предлагает соблюдать сложившиеся стилистические и оформительские признаки стиля АиПИ в части заголовков, подрисуночных подписей, оформления библиографических ссылок и т. д.

Пожалуйста, используйте курсив для латиницы в русскоязычных статьях, для сокращенных наименований физических величин после их численного значения, а также для полных или сокращенных слов «таблица», «рисунок», «приложение», «теорема», «лемма», «пример» и так далее, если после этих слов применена нумерация.

Например, «... как показано на этом рисунке», но «На *рис. 2* показано».

Для чисел использовать курсив не следует, кроме случаев, когда числами обозначаются блоки или элементы на рисунке.

Например:  $F_2 = 33,5 \text{ Н}$ .

Не следует использовать наименования физических величин в сокращенном виде в разрыве (вследствие переноса на другую строку) от их численного значения. Чтобы этого избежать, применяйте символ «неразрывный

пробел». Также не применяйте эти сокращенные наименования, а также знаки математических операций при отсутствии численного значения.

Например, некорректным по этому признаку является фраза: «Сила тока =  $3 \text{ А}$ », или «Сила тока составляет несколько  $\text{А}$ ». Следует применять корректную запись, например: «Сила тока  $I = 3 \text{ А}$ » или «Сила тока составляет несколько *Ампер*».

Статьи, оформленные с существенными нарушениями требований к оформлению, могут быть отклонены от опубликования на этом основании.

Авторов из Российской Федерации просим присылать экспертное заключение на разрешение открытого опубликования, можно скан на электронную почту главного редактора.

Настоятельно просим авторов соблюдать правила русского языка, орфографии и синтаксиса, а также традиционные требования к оформлению электронных текстов статьи, обращая внимание на такие ошибки, которые подчеркивает текстовый редактор Word. В частности, при использовании запятой, точки, двоеточия и точки с запятой между этим символом и концом слова не ставьте пробела, после этого символа обязательно ставьте пробел. В случае перечисления также используйте пробелы только после запятой, но не перед запятой. В случае ссылки на несколько подряд идущих источников применяйте тире между первой и последней ссылкой, например, не следует писать [1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9], вместо этого применяйте [1–4, 6–9]. Обращайте внимание на использование точек. В конце заголовка и в конце подрисуночной подписи точка не ставится. Не следует ставить точку перед ссылкой в конце предложения, точка ставится только после этой ссылки. Также просим корректно использовать дефисы и тире, в соответствии с правилами русского языка.

Наименования физических величин просим писать курсивом, не в скобках. В качестве десятичного знака, отделяющего целые доли от десятичных, в русскоязычных текстах принято использовать запятую, а в англоязычных текстах – точку, просим не путать эти знаки. Если иллюстрация или таблица сформирована с помощью программного обеспечения, которое использует в этом качестве точку, то исправления на иллюстрации или в таблице не обязательны, если они вставлены как графические объекты. В текстах и формулах соблюдение правильности использования этого символа обязательно.

#### О РАЗДЕЛЕ «ДИСКУССИИ. ФОРУМ»

В раздел «Дискуссии. Форум» принимаются статьи, которые могут положить начало дискуссиям по актуальным вопросам в русле тематики журнала «АиПИ».

Статьи данного раздела не подвергаются строгому научному рецензированию, а именно: при наличии как положительных, так и отрицательных рецензий, либо при несовпадении точки зрения авторов с точкой зрения большинства членов редакционной коллегии, статьи могут быть опубликованы в этом разделе на правах дискуссионного выступления автора. Редакционная коллегия приветствует научные дискуссии сторонников несовпадающих мнений

с целью развития теорий. Редакционная коллегия призывает читателей присылать отклики на статьи, опубликованные в разделе «Дискуссии». Избранные отклики на статьи раздела «Дискуссии» также как избранные мотивированные отклики на другие статьи журнала «АиПИ» будут публиковаться в разделе «Форум» (по усмотрению редакции – в сокращении или в конспективном изложении).

## Content

<b>I. Automation. Automated Systems</b>	<b>7</b>
Evgeny BASINYA, Galina FRANTSUZOVA, Andrey GUNKO. <b>Self-Organizing System of Traffic Control of Computer Net: Remote Net Access</b>	9
Vladimir GUZHOV, Igor SAZHIN, Andrey SAZHIN, Vladimir SHUMEYKO. <b>Method of Control of Process of Heat Irradiation in Condenser in Cooling Plant</b>	13
Maxim SKOROSPESHKIN, Vladimir SKOROSPESHKIN, Gennadiy TSAPKO. <b>Modified PID-Regulator</b>	20
Maxim SKOROSPESHKIN, Vladimir SKOROSPESHKIN, Gennadiy TSAPKO. <b>Adaptive System for Temperature Control of Thermal Exchanger</b>	24
<b>II. Robotics. Software and Systems. Free Software. Open Software</b>	<b>27</b>
Rishat USMANOV, Kuanishbay SEITNAZAROV. <b>Software Complex of Fuzzy-Determined Modeling of Hidrological Objects</b>	29
Alexey PONOMAREV, Eduard MERKER. <b>Integrated Electronic Medical Records of the Child</b>	35
A. M. MALYSHENKO, E. A. RYBAKOV, T. A. KOCHETKOVA. <b>Software for Determining the Indices of Causality for Linear Input-Output Dynamic Systems</b>	40
<b>III. Innovative Technologies. Promising Technologies. Simulation of Systems. Numerical optimization</b>	<b>51</b>
S.N. GRUDININ, V.D. FROLOVSKY. <b>Subject Parameterization of Virtual Mannequins</b>	53
Vadim ZHMUD, Oleg YADRISHNIKOV. <b>Optimization of Regulator for Multi-Channel Objects with the Developing of the Idea of Smith's Predictor</b>	57

A.M. RASULOV, A.A. DZHURAHALOV, I.D. YADGAROV, V.G. STELMAKH. <b>Processes of Forming of Nano-Structures during Concretion of Clusters to Surface of Crystals with the Helps of Computer Modeling</b>	68
Vadim ZHMUD, Oleg YADRISHNIKOV. <b>Effectiveness of PID- regulator Fullness for Control of Multi-Channel Objects</b>	76
<b>IV. Measuring Means and Systems</b>	<b>80</b>
S.M. ALFEROV, A.M. KORIKOV. <b>Automatization of Process of Calibration of Manometers Scales</b>	82
<b>V. Popular Papers. Intriduction into Specialities</b>	<b>93</b>
Vitaly TRUBIN, Aleksey ESKIN, Andrey PECHNIKOV, Vadim ZHMUD. <b>The use of Internet for Interactive Laboratory Work for the Distance Control of Robot-Snow-Fightong Vecicle</b>	95
Vadim ZHMUD. <b>Precision Measuring of Frequency for Attectation of Frequency Standards</b>	104
Nematzhon RAKHIMOV. <b>What does APV means?</b>	120
<b>VI. Discussions. Forum. Information for Authors</b>	<b>125</b>
Vadim ZHMUD. <b>Nyquist-Shennon and Kotelnikov Theorem, the Uncertainty Principle, and the Speed of Light</b>	127
<b>Requirements for Publication in Scientific Electronic Journal "Automation and Software Engineering"</b>	137
<b>Content</b>	<b>140</b>