

ISSN 2618-7558 (pdf-version)  
ISSN 2312-4997 (paper version)

# АВТОМАТИКА И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

2018 N 2(24)

Automatics & Software Engineering. 2018. N2(24)

**Главный редактор д.т.н., доцент В.А. Жмудь**, заведующий кафедрой автоматике ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), зам. директора ПАО «Новосибирский институт программных систем» (НИПС), **Новосибирск, Россия**

**Редакционный совет:**

**Вадим Аркадьевич Жмудь**      Главный редактор, Председатель редакционного совета, заведующий кафедрой автоматике ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), зам. директора ПАО «Новосибирский институт программных систем» (НИПС), 630073, просп. К.Маркса, д.20, НГТУ; 360090, просп. Ак. Лаврентьева, д. 6/1, НИПС, **Новосибирск, Россия**

**Галина Александровна Французова**      Заместитель главного редактора, заместитель председателя редакционного совета, профессор кафедры автоматике ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ), **Новосибирск, Россия**

**Александр Валерьевич Ляпидевский**      Директор организации-учредителя ПАО «Новосибирский институт программных систем» (ПАО «НИПС»), к.э.н., **Новосибирск, Россия**

**Уранчимэг Тудэвдагвын**      Профессор Института Энергетики, Доктор Технических наук, Член докторского диссертационного совета по информатике и связи Монголии, МГУНиТ Член высшего научного совета МГУНиТ, Член научного совета Института Энергетики, Заслуженный доктор НГТУ, **Германия, Монголия**

**Любомир Ванков Димитров**      Проректор по международным связям Технического университета Софии, доктор, профессор, Заслуженный доктор НГТУ, София (Sofia), **София, Болгария**

**Алексей Владимирович Тайченачев**      Директор ФГБУН Институт лазерной физики СО РАН, д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, член президиума ВАК РФ, **Новосибирск, Россия**

**Эрик Хальбах**      Д.т.н., Технологический университет Тампере, Лаборатория автоматике и гидравлики, П.О. А/я 589, 33101 **Тампере, Финляндия**

**Редакционная коллегия:**

**Анатолий Сергеевич Востриков**      Профессор кафедры Автоматике НГТУ, д.т.н., Заслуженный преподаватель РФ, академик МАН ВШ, **Москва, Россия**

**Николай Дмитриевич Поляхов**      Д.т.н., профессор, СПбГЭТУ, член редакционной коллегии журнала «Электричество», член экспертного совета ВАК РФ. **Санкт-Петербург, Россия**

**Евгений Борисович Цой**      Заслуженный работник НГТУ, профессор, д.т.н. Новосибирский государственный технический университет, **Новосибирск, Россия**

- Владимир Иванович Гужов** Профессор кафедры Систем сбора и обработки данных, Новосибирский государственный технический университет, **Новосибирск, Россия**
- Шива С. Махапатра** Профессор кафедры Машиностроения в Национальном Институте Технологии, **Роукела (Rourkela), Индия**
- Губерт Рот** Заведующий кафедрой Автоматизированного управления в университете Зигена, профессор, **Зиген (Siegen), Germany**
- Ю Бо** Директор Института робототехники и Технологии автоматизации, Декан факультета Автоматики, Профессор, Харбинский университет науки и техники, **Харбин (Harbin), Китай**
- Ярослав Носек** Профессор факультета мехатроники, информатики и междисциплинарного образования Технического университета Либерец (ТУЛ) доктор, Заслуженный доктор НГТУ, **Либерец, Чехия**
- Петр Тума** Профессор факультета мехатроники, информатики и междисциплинарного образования Технического университета Либерец (ТУЛ), г. **Либерец**, доктор, **Чехия**
- Терри Шато** Заведующий кафедрой, профессор, Институт Паскаля, Университет Блейз Паскаль, **Клермон-Ферран, Франция.**
- Вольфрам Хардт** Заместитель декана по международным делам, директор Университетского компьютерного центра, Профессор вычислительной техники, Хемницкий технологический университет, **Хемниц, Германия**
- Вимал Дж. Савсани** Доцент в высшем колледже электротехники и технологии им. Б.Х. Гарди, **Сурат, Индия**
- Равипуди Венката Рао** Д.т.н. (**Польша**). Профессор, факультет машиностроения, Бывший декан и руководитель Национального института технологии им. Сардара Валлабхбая (Институт национального значения правительства Индии) Иччанат, Сурат-395 007, Гуджарат, **Сурат, Индия.**
- Неьматжон Рахимович Рахимов** Профессор кафедры Разведки и разработки нефтяных и газовых месторождений филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Октябрьском, д.т.н., **Уфа, Россия**
- Геннадий Павлович Цапко** Профессор кафедры автоматики и компьютерных систем Томского политехнического университета (ФГАОУ ВПО НИ ТПУ), директор Научно-образовательного центра CALS-технологий, профессор, д.т.н., академик Международной академии информатизации, **Томск, Россия**
- Александр Максимович Малышенко** Профессор Отделения автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники ФГАОУ ВПО НИ ТПУ, д.т.н., академик МАН ВШ и Академии электротехнических наук РФ, **Томск, Россия**

- Вадим Яковлевич Копп** Заведующий кафедрой автоматизированных приборных систем Севастопольского национального технического университета, Заслуженный деятель науки и техники Украины, д.т.н., профессор, **Севастополь, Россия**
- Александр Александрович Воевода** Профессор кафедры Автоматики НГТУ, д.т.н., академик МАН ВШ, **Новосибирск, Россия**
- Евгений Владимирович Рабинович** Профессор кафедры Вычислительной техники НГТУ, д.т.н., профессор, **Новосибирск, Россия**
- Михаил Геннадьевич Гриф** Профессор кафедры Автоматизированных систем управления НГТУ, д.т.н., профессор, **Новосибирск, Россия**
- Борис Дмитриевич Борисов** Заведующий лабораторией Института Лазерной физики СО РАН (ИЛФ СО РАН), д.т.н., **Новосибирск, Россия**
- Сергей Леонидович Миньков** Заведующий кафедрой информационного обеспечения инновационной деятельности Национального исследовательского университета «Томский государственный университет», к.ф.-м.н., ст. н. с., чл.-корр. МАИ, **Томск, Россия**
- Борис Викторович Поллер** Заведующий лабораторией Института Лазерной физики СО РАН (ИЛФ СО РАН), д.т.н., **Новосибирск, Россия**
- Татьяна Владимировна Авдеенко** Профессор кафедры Экономической информатики НГТУ, профессор, д.т.н., **Новосибирск, Россия**
- Баярын Бат-Эрдэнэ** Заместитель директора по научным исследованиям и инновациям Энергетического Института Монгольского государственного университета науки и технологии, к.т.н. асс. профессор. **Улаан-Баатор, Монголия**
- Анатолий Михайлович Кориков** Зав. кафедрой автоматизированных систем управления и радиоэлектроники ТУСУРа, профессор, д.т.н., акад. МАН ВШ, специалист в области системного анализа и ТАУ. **Томск, Россия**
- Виталий Сергеевич Щербаков** Декан факультета «Нефтегазовая и строительная техника», д.т.н., профессор СибАДИ, **Омск, Россия**
- Алексей Александрович Руппель** И.о. зав. каф. АППиЭ, к.т.н., доцент СибАДИ, **Омск, Россия**
- Сэнгэ Самбуевич Ямпиров** Профессор каф. «Биомедицинская техника» ПАПИ, д.т.н., **Улан-Удэ, Россия**
- Владимир Иванович Гололобов** Руководитель лаборатории ПАО «НИПС», к.т.н., **Новосибирск, Россия**
- Константин Витальевич Змеу** Доцент, к.т.н., Заведующий кафедрой Технологий промышленного производства, Инженерной школы Федерального дальневосточного университета, **Владивосток, Россия**
- Олег Владимирович** Д.т.н., профессор Национального исследовательского

<b>Стукач</b>	Томского политехнического университета, <b>Томск, Россия</b>
<b>Алексей Дмитриевич Припадчев</b>	Д.т.н., профессор, Заведующий кафедрой летательных аппаратов ФГБОУ ВПО «Ориенбургский государственный университет», Аэрокосмический институт, <b>Оренбург, Россия</b>
<b>Виктор Петрович Мельчинов</b>	К.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, <b>Якутск, Россия</b>
<b>Вячеслав Николаевич Федоров</b>	К.т.н., доцент кафедры радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, <b>Якутск, Россия</b>
<b>Ульяна Анатольевна Михалёва</b>	К.т.н., заведующий кафедрой «Многоканальные телекоммуникационные системы» Технологического института ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова, <b>Якутск, Россия</b>
<b>Анастасия Дмитриевна Стоцкая</b>	К.т.н., доцент, зам. зав. кафедрой Систем автоматического управления, Санкт-Петербургский Электротехнический университет (ЭТУ ЛЭТИ), <b>Санкт-Петербург, Россия</b>
<b>Анастасия Георгиевна Русина</b>	профессор кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, доктор технических наук, доцент, <b>Новосибирск, Россия</b>
<b>Михаил Витальевич Калинин</b>	Контент-менеджер ПАО «НИПС», <b>Новосибирск, Россия</b>

УДК 681.2; 681.3; 681.5; 681.7

Научно-технический журнал «Автоматика и программная инженерия»

Название журнала на английском языке: Automatics & Software Enginery (сокращенное название: A&SE).

ISSN 2312-4997 для бумажной версии на русском языке

ISSN 2618-7558 для электронной версии на русском языке

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-55079

Дата основания: июнь 2012 г.

**Учредитель журнала:**

Публичное акционерное общество «Новосибирский институт программных систем»

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

Журнал входит в наукометрическую базу РИНЦ (Российский индекс научного цитирования, договор № 497-08/2014 от 20.08.2014 г.).

**Адрес редакции:**

630090, Россия, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, б/1,

ОАО «НИПС», заместителю директора по науке

e-mail: [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@bk.ru)

web: <http://www.jurnal.nips.ru/>

Подписано в печать 28 июня 2018 г.

## Оглавление

<b>I. Автоматика. Автоматизированные системы.....</b>	<b>8</b>
Синтез робастных систем с ПИД-регулятором для нелинейных объектов с переменными параметрами.....	9
<i>Г. А. Французова</i> .....	9
Эффективное упрощение прецизионного синтезатора частоты .....	17
<i>В.А. Жмудь<sup>1</sup>, Л.В. Димитров<sup>2</sup>, А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup></i> .....	17
Плавное управление прецизионным синтезатором частот.....	25
<i>В.А. Жмудь<sup>1</sup>, Л.В. Димитров<sup>2</sup>, А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup></i> .....	25
<b>II. Робототехника. Электроника. Программные средства и системы.</b>	<b>32</b>
Получение желаемого качества переходных процессов системы стабилизации двухколесного балансирующего робота на основе численной оптимизации .....	33
<i>А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup>, В. А. Жмудь<sup>1</sup>, В. Г. Трубин<sup>1</sup>, Г.Рот<sup>2</sup></i> .....	33
Автоматизация выделения формант и поиска выравненных фрагментов фонограмм при подготовке к проведению фоноскопической экспертизы.....	45
<i>И.А. Гураков, Е.Ю. Костюченко, Д.И. Новохрестова</i> .....	45
<b>III. Инновационные технологии. Перспективные технологии.</b>	
<b>    Моделирование систем. Численная оптимизация.....</b>	<b>51</b>
Методы проектирования и моделирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории .....	52
<i>М.Г. Гриф, С. А. Кочетов, Н. Д. Ганелина</i> .....	52
<b>IV. Измерительные средства и системы. Идентификация.</b>	
<b>    Телемеханика и телеметрия.....</b>	<b>59</b>
Технология построения сейсмических изображений .....	60
<i>Е. В. Рабинович, Г. С. Шефель, А. В. Жуков</i> .....	60
Алгоритм идентификация импульсной переходной функции при высоком уровне шума измерения входного сигнала системы.....	67
<i>Ю.Е. Воскобойников<sup>1,2</sup>, Д. А. Крысов<sup>2</sup></i> .....	67
<b>V. Информационные технологии.....</b>	<b>76</b>
Разработка системы мониторинга работы пользователей ПК для оптимизации бизнес-процессов предприятия .....	77
<i>Е. А. Басыня<sup>1,2</sup>, С. В. Казарбин<sup>2</sup></i> .....	77
Разработка межсетевого ретранслятора .....	83
<i>Е. А. Басыня<sup>1,2</sup>, А.А. Юшманов<sup>2</sup></i> .....	83
<b>VI. Инструментарий теории замкнутых динамических систем для физических и технических наук. К сведению авторов.....</b>	<b>90</b>
Относительность в свете теории замкнутых динамических систем и критика ее критики .....	91
<i>В.А. Жмудь</i> .....	91
Современные методы измерения частоты и фазы в реальном времени.....	117
<i>Д.О. Терешкин, В.М. Семибаламут</i> .....	117
Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия».....	131
Content .....	136

## I. Автоматика. Автоматизированные системы.

### Содержание раздела:

- ◇ Французова Г. А. Синтез робастных систем с ПИ2Д-регулятором для нелинейных объектов с переменными параметрами. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 9–16.
- ◇ Жмудь В.А., Димитров Л.В., Ивойлов А.Ю. Эффективное упрощение прецизионного синтезатора частоты. ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия. Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 17–24.
- ◇ Жмудь В.А., Димитров Л.В., Ивойлов А.Ю. Плавное управление прецизионным синтезатором частот. ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия. Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 25–31.

# Синтез робастных систем с ПИ2Д-регулятором для нелинейных объектов с переменными параметрами

Г. А. Французова

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*Аннотация:* В данной работе рассматривается модификация типового ПИД-регулятора путем добавления дополнительного канала дифференцирования. Это позволяет расширить область применения типовых регуляторов на класс нелинейных нестационарных объектов второго порядка. В результате получается линейный регулятор с двойным дифференцированием, который принято называть ПИ2Д-регулятором. В работе предложено переносить дифференциальные составляющие в канал обратной связи, что позволяет устранить  $\delta$ -подобные броски по управлению в системах стабилизации с таким регулятором. Показано, что такое распределение отдельных составляющих ПИ2Д-регулятора приводит к появлению в замкнутой системе двух контуров управления, каждый из которых может быть рассчитан отдельно. Внутренний контур системы содержит нелинейный объект управления, пропорциональную и две дифференциальные составляющие регулятора. Во внешнем контуре управления остается его интегральная составляющая. Исходя из полученной структуры системы, предложена процедура расчёта коэффициентов ПИ2Д-регулятора для нелинейного объекта второго порядка в два этапа. Поскольку структура внутреннего контура соответствует системе на основе метода локализации, то на первом этапе для расчета коэффициента пропорциональной составляющей рекомендовано использовать известные соотношения этого подхода. Показано, что в этом случае поведение внутреннего контура подчиняется линейному уравнению, которое определяют дифференциальные составляющие регулятора. В результате весь внешний контур управления является тоже линейным. Это позволяет на втором этапе для расчета остальных параметров ПИ2Д-регулятора применять модальный подход и формировать заданное распределение корней в системе. Показано, что рассчитанный по данной процедуре ПИ2Д-регулятор является робастным. Он полностью решает задачу стабилизации нелинейных нестационарных объектов второго порядка, подверженных действию внешних неконтролируемых возмущений. Основные свойства системы иллюстрируют результаты численного моделирования в среде *MatLab*.

*Ключевые слова:* ПИ2Д-регулятор, нелинейный объект, метод локализации, робастная система.

## ВВЕДЕНИЕ

Как известно, одними из первых промышленных регуляторов являются типовые PID-регуляторы, которые до сих пор широко используются в промышленности и не утратили свою актуальность в настоящее время [1–7]. Причинами такой популярности являются их простота, изученность свойств и принципа действия, возможность их применения для решения большинства практических задач и низкая стоимость.

Однако, несмотря на большее число рекомендаций по настройке [2, 3, 5, 6], расчету [1, 4, 8] и оптимизации параметров типовых регуляторов [9, 21–29], универсальной методики их синтеза пока не предложено. В результате после расчета ПИД-регулятора приходится уточнять его параметры и осуществлять их ручную подстройку. В ситуации, когда существенное влияние оказывают внешние факторы (изменение нагрузки, температуры окру-

жающей среды и т. п.) или с течением времени изменяются параметры самого объекта, типовые регуляторы не всегда обеспечивают требуемое качество работы автоматической системы.

Для нелинейных объектов первого порядка типовой ПИД-регулятор позволяет полностью решить задачу стабилизации [10, 11]. Их применение для объектов более высокого порядка влечет за собой вынужденное ослабление требований к качеству процессов в системе, особенно при наличии в ней нелинейных элементов.

С целью расширения области применения ПИД-регулятора предлагаются различные его модификации: П2ИД [10], ПИ2Д [12], регулятор дробного порядка [13], регулятор с весовыми коэффициентами по ошибке и др. [2, 6, 14]. В первую очередь, преобразование регулятора предполагает наделение его свойством робастности [11–15].

Эффективным подходом к синтезу регуляторов для класса нелинейных объектов, функциони-

рующих в условиях действия внешних возмущений, является метод локализации [16–18]. Полученный в результате регулятор обладает свойством робастности как по отношению к нелинейным характеристикам объекта, так и к действию внешних возмущающих факторов.

В данной работе представлен ПИ2Д-регулятор, полученный путём добавления к типовому ПИД-регулятору дополнительного канала двойного дифференцирования [12]. Причем предложено выделить отдельные составляющие и переносить дифференциальный канал в обратную связь, что приводит к появлению в системе двух контуров управления. Процедуру расчёта коэффициентов ПИ2Д-регулятора предложено проводить в два этапа. Структура внутреннего контура соответствует системе на основе метода локализации, поэтому для его расчета можно использовать соотношение этого подхода [17–19]. При синтезе линейного внешнего контура управления предлагается применять процедуру модального метода синтеза.

Цель настоящей работы – исследовать возможности системы с ПИ2Д-регулятором и предложить процедуру расчёта коэффициентов регулятора для класса нелинейных нестационарных объектов второго порядка на основе соотношений метода локализации

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу стабилизации для нелинейного нестационарного объекта второго порядка, модель которого имеет вид

$$\ddot{y} = f(t, \dot{y}, y) + b(t, \dot{y}, y)u, \quad (1)$$

где  $y \in R^1$  - выходная переменная объекта;  $u \in R^1$  - управляющее воздействие; функции  $f(t, \dot{y}, y)$  и  $b(t, \dot{y}, y)$  – непрерывные и дифференцируемые, имеют ограниченные производные; их значения могут изменяться в рабочем диапазоне:  $|f(\cdot)| \leq f_{\max}$ ,  $0 < b_{\min} \leq |b(\cdot)| \leq b_{\max}$  в зависимости от условий работы системы. Также на объект могут действовать возмущения, что отражает зависимость функций от времени.

Необходимо рассчитать линейный робастный регулятор для обеспечения требований, заданных к качеству процесса в системе в виде оценок времени переходного процесса, перерегулирования и допустимой ошибки в статике.

## 2. ОПИСАНИЕ РЕГУЛЯТОРА

Будем рассматривать модифицированный типовой ПИД-регулятор, к которому добавим канал двойного дифференцирования. В результате получим ПИ2Д-регулятор [12] с передаточной функцией вида

$$W_{PI2D}(s) = k_p + \frac{k_i}{s} + k_{D1}s + k_{D2}s^2 \quad (2)$$

где  $k_p$ ,  $k_i$ ,  $k_{D1}$  и  $k_{D2}$  - коэффициенты пропорциональной, интегральной<sup>1</sup> и дифференциальных<sup>2</sup> составляющих соответственно.

Основной проблемой при реализации как ПИД-так и ПИ2Д-регулятора являются дифференциальные составляющие [6, 11], наличие которых приводит к усилению влияния шума измерений и уменьшению соотношения «полезный сигнал/шум». Кроме того, при обработке ступенчатого входного сигнала на выходе таких регуляторов возникают дельта-подобные импульсы большой амплитуды, что может привести к серьёзным последствиям. Для уменьшения подобных эффектов используют специальные низкочастотные фильтры и переносят дифференциальную составляющую регулятора в обратную связь [11, 12, 18].

Рассмотрим возможности ПИ2Д-регулятора, у которого выделим две составляющие: интегральную составляющую и пропорционально-дифференциальную часть. В результате его передаточную функцию (2) представим в виде

$$W_{PI2D}(s) = k_{D2} \left[ \frac{c_0}{s} + (s^2 + c_2s + c_1) \right], \quad (3)$$

где введены следующие обозначения:

$$c_0 = k_i/k_{D2}, \quad c_1 = k_p/k_{D2}, \quad c_2 = k_{D1}/k_{D2}. \quad (4)$$

Для режимов обработки входа и слежения дифференциальную составляющую в системе с ПИ2Д-регулятором перенесём в канал обратной связи, как показано на Рис. 1.

<sup>1</sup> Редакция рекомендует пользоваться термином «интегрирующий», поскольку термин «интегральный» часто используется в технике в значении «объединяющий», «суммирующий» (ср.: «интегральная микросхема») (Прим. ред.).

<sup>2</sup> Редакция рекомендует пользоваться термином «дифференцирующий», поскольку термин «дифференциальный» часто используется в технике для обозначения операции вычитания (ср.: «дифференциальный усилитель») (Прим. Ред.).

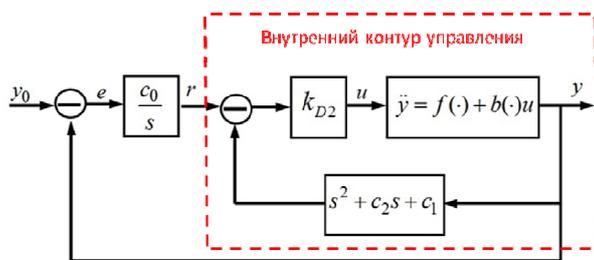


Рис. 1. Схема системы с преобразованным ПИ2Д-регулятором

Как видно, система содержит нелинейный объект управления и линейный регулятор. Она имеет два контура управления, поэтому предлагается рассчитывать регулятор в два этапа.

### 3. РАСЧЕТ ПИ2Д-РЕГУЛЯТОРА

При рассмотрении структуры системы (Рис. 1) видно, что внутренний контур полностью соответствует структуре системы, основанной на методе локализации [17, 19]. Поскольку этот метод ориентирован на класс нелинейных нестационарных объектов, предлагается сначала рассчитывать внутренний контур с учетом соотношений метода локализации.

В соответствии с представленной структурой системы запишем уравнение пропорционально-дифференциальной части регулятора (3) в виде

$$u = k_{D2} [r - c_1 y - c_2 \dot{y} - \ddot{y}]$$

или

$$u = k_{D2} [F(y, \dot{y}, r) - \ddot{y}], \quad (5)$$

где  $F(y, \dot{y}, r) = r - c_1 y - c_2 \dot{y}$  можно рассматривать как функцию, отражающую желаемое поведение внутреннего контура системы.

Подставляя (5) в уравнение объекта (1), получим после преобразования описание контура в форме

$$\ddot{y} = \frac{1}{1 + b(\cdot)k_{D2}} f(t, \dot{y}, y) + \frac{1}{1 + b(\cdot)k_{D2}} F(y, \dot{y}, r)$$

Отсюда видно, что в пределе при  $k_{D2} \rightarrow \infty$  поведение контура описывает желаемое уравнение

$$\ddot{y} = F(y, \dot{y}, r). \quad (6)$$

Для практических расчетов  $k_{D2}$  будем использовать рекомендации метода локализации [17], т. е. выбирать коэффициент в зависимости от требуемой точности в виде

$$b_{\min} k_{D2} \approx 20 \dots 100. \quad (7)$$

Подчинив динамику внутреннего контура линейному уравнению (6), его модель можно представить в виде передаточной функции

$$W_{inner}(s) = \frac{y}{r} = \frac{1}{s^2 + c_2 s + c_1}.$$

Переходим теперь к расчету внешнего контура (Рис. 2), который уже не зависит от нестационарности параметров и нелинейных характеристик объекта управления (1).

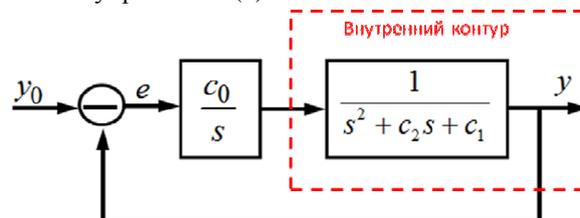


Рис. 2. Структурная схема внешнего контура

Для вычисления коэффициентов регулятора  $c_i, i = \overline{0, 2}$  используем аппарат линейной теории управления, а именно: модальный подход [20]. В соответствии с ним определим характеристическое уравнение контура в виде

$$A(s) = s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0 = 0. \quad (8)$$

Теперь на основе заданных требований к процессам системы сформируем желаемое характеристическое уравнение

$$D(s) = s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0 = 0. \quad (9)$$

Как видно из сравнения (8) и (9), коэффициенты ПИ2Д-регулятора в форме (3) равны коэффициентам желаемого характеристического уравнения (9), т. е.  $c_i = d_i, i = \overline{0, 2}$ . Отсюда по соотношениям (4) и (7) вычисляются исходные параметры ПИ2Д-регулятора:

$$\begin{cases} k_I = d_0 \cdot k_{D2}, & k_P = d_1 \cdot k_{D2}, \\ k_{D1} = d_2 \cdot k_{D2}, & b_{\min} k_{D2} \approx 20 \dots 100. \end{cases} \quad (10)$$

### 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕАЛИЗАЦИИ ПИ2Д-РЕГУЛЯТОРА

Реализация ПИ2Д-регулятора предполагает применение для получения дифференциальных составляющих специальных устройств. С этой целью предлагается использовать при отсутствии шума измерений линейное звено (так называемый, дифференцирующий фильтр [16, 17, 20]) со следующей передаточной функцией:

$$W_f(s) = \frac{1}{\mu^2 s^2 + 2d\mu s + 1}, \quad (11)$$

где  $\mu$  – постоянная времени устройства;  $d$  – коэффициент демпфирования. Выбор численного значения  $\mu$  должен обеспечивать переходные процессы в фильтре на порядок быстрее, чем в системе. Коэффициент демпфирования выбирается из условия отсутствия колебаний, т. е., как правило, в диапазоне  $d \approx (0,5 \dots 0,7)$ .

При использовании устройства (11) пропорционально-дифференциальная часть регулятора в канале обратной связи описывается передаточной функцией

$$W_{DP}(s) = \frac{s^2 + c_2s + c_1}{\mu^2 s^2 + 2d\mu s + 1},$$

реализация которой на вызывает затруднений. Структурная схема системы представлена на Рис. 3.

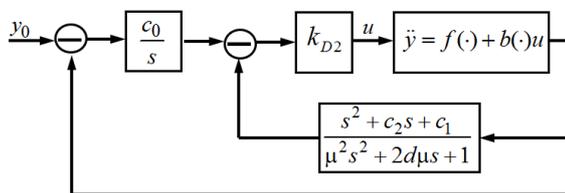


Рис. 3. Схема системы с учетом реального дифференцирования

Следует отметить, что при наличии шума измерений следует повышать порядок устройства (11) аналогично соответствующим рекомендациям метода локализации.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассмотрим свойства системы с PI2D-регулятором (3) и объектом, модель которого имеет вид

$$\ddot{y} = a_1(t)y\dot{y} - a_2(t)y^2 + b(t)u + M(t),$$

где параметры могут изменяться в диапазоне:  $-2 \leq a_1 \leq 5$ ;  $0 \leq a_2(t) \leq 2$ ;  $4 \leq b \leq 6$ ; возмущение  $M(t) = M_m(t - t_0)$ ;  $M_m = 10$ ;  $t_0 = 1c$ .

Требования к переходным процессам системы следующие:  $t_n \leq 4c$ ;  $\sigma \leq 5\%$ ; статическая ошибка отсутствует. В соответствии с ними сформировано эталонное уравнение (9) в виде

$$D(s) = s^3 + 6s^2 + 16s + 16 = 0.$$

Таким образом, параметры регулятора в канале обратной связи следующие:  $c_0 = 10$ ,  $c_1 = 13$  и  $x_2 = 6$ . Общий коэффициент  $k_{D2}$  выбран из соотношения  $b_{\min}k_{D2} = 50$ , т.е.  $k_{D2} = 12$ . Дифференцирующий фильтр (10) имеет параметры  $\mu = 0.01$  и  $d = 0.5$ .

Рассмотрим работоспособность системы, схема моделирования которой в среде *MatLab* (при отсутствии возмущений) показана на Рис. 4.

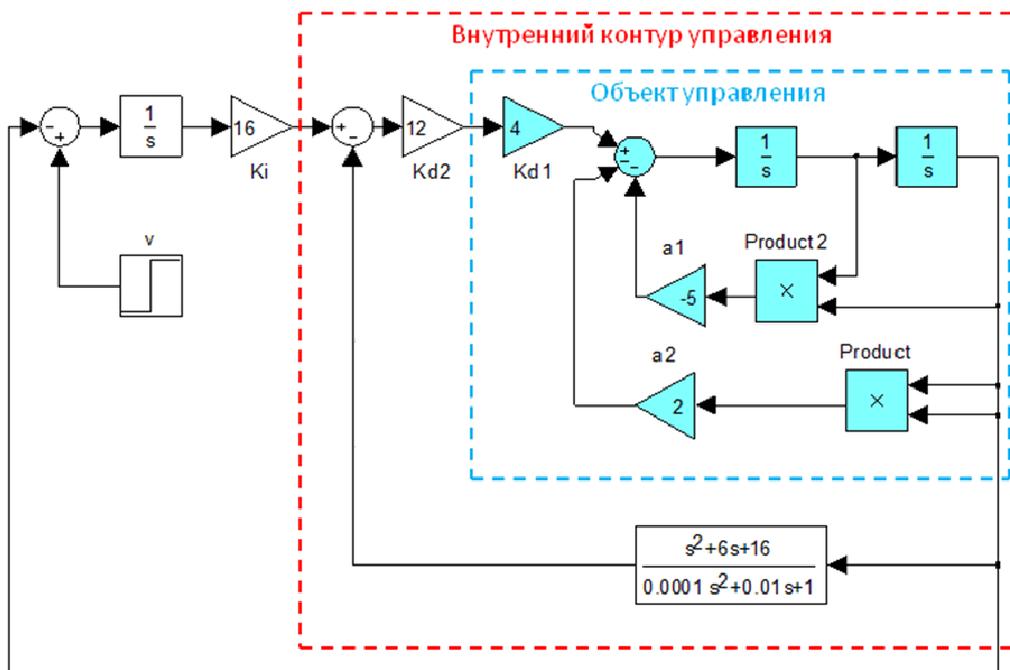
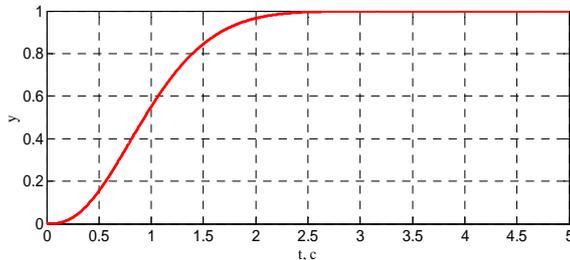


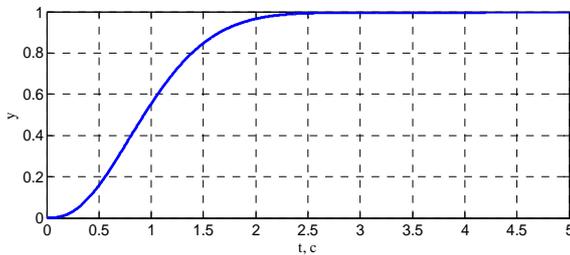
Рис. 4. Схема моделирования замкнутой системы

На *Рис. 5* показана желаемая переходная характеристика системы, соответствующая эталонному уравнению (9).

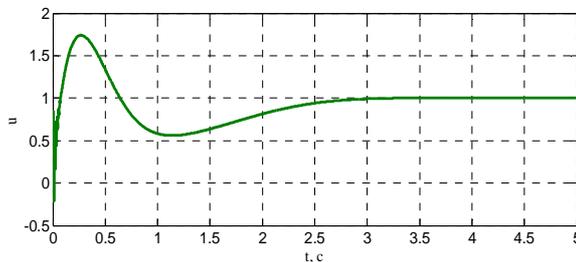
На следующих графиках представлена переходная характеристика (*Рис. 6*) и управляющее воздействие в системе (*Рис. 7* и *Рис. 8*) при постоянных значениях параметров и отсутствии внешних возмущений.



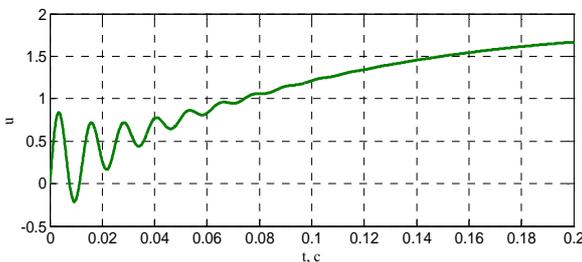
*Рис. 5.* Эталонная характеристика системы



*Рис. 6.* Переходная характеристика замкнутой системы



*Рис. 7.* Изменение управляющего воздействия в системе

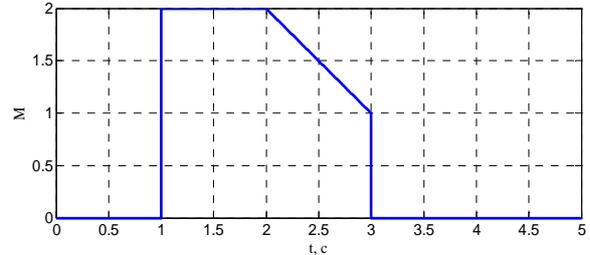


*Рис. 8.* Начальный участок управляющего воздействия

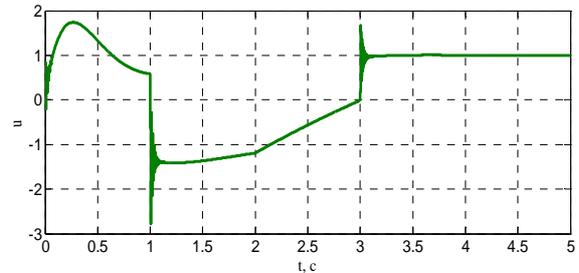
Как видно, данный регулятор обеспечивает качество процессов, соответствующее заданным требованиям, т.е. выход системы (*Рис. 6*) совпадает с заданной точностью с эталонным уравнением (*Рис. 5*). Колебания на начальном участке управления (*Рис. 7* и *Рис. 8*) – это быстрые процессы, обусловленные наличием в системе

специального дифференцирующего устройства (10) с малой постоянной времени.

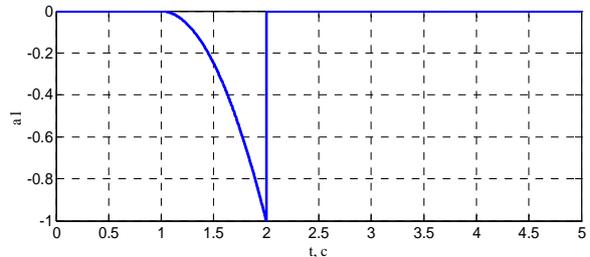
Графики, представленные на *Рис. 9* и *Рис. 10*, иллюстрируют вид неконтролируемого возмущения  $M(t)$  и изменение управления при его наличии соответственно. Вид изменения во времени параметра  $a_1(t)$  представлен на *Рис. 11*, а соответствующий ему характер изменения управляющего воздействия показан на *Рис. 12*.



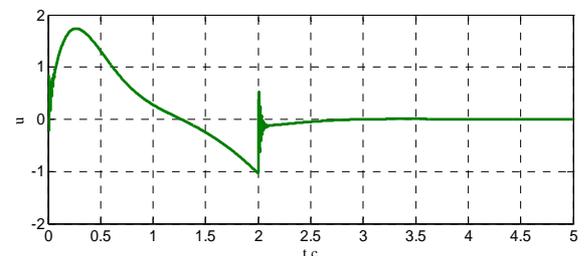
*Рис. 9.* График изменения возмущения  $M(t)$



*Рис. 10.* Влияние возмущения на управление



*Рис. 11.* График изменения параметра  $a_1(t)$



*Рис. 12.* Влияние нестационарного параметра  $a_1(t)$  на управляющее воздействие

Важно отметить, что как наличие возмущения  $M(t)$ , так и нестационарность параметра  $a_1(t)$  никак не отражается на выходной характеристике

системы; она и в этих случаях имеет вид, представленный на *Рис. 6*.

Этот факт обусловлен тем, что нестационарные параметры и внешнее возмущение быстро обрабатываются во внутреннем контуре системы, как хорошо заметно по *Рис. 10* и *Рис. 12*. При этом даже существенное изменение параметров нелинейного объекта никак не влияет на выходную переменную системы с регулятором. Процесс остается неизменным и соответствует с требуемой точностью *Рис. 5*.

Таким образом, рассчитанный ПИ2Д-регулятор является робастным и обеспечивает инвариантность системы по отношению к изменению параметров объекта в широком диапазоне, а также к действию внешних возмущений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена возможность применения соотношений метода локализации к расчету параметров PI2D-регулятора, который можно использовать для решения технической задачи стабилизации систем управления низкого порядка. Преимущество представленного подхода заключается в том, что коэффициенты рассчитанного регулятора не зависят от свойств объекта, что позволяет обеспечить требуемое динамическое качество процессов в системе в условиях нелинейных характеристик и нестационарных параметров объекта, а также действию внешних неконтролируемых возмущений.

Заметим также, что предложенный тип регуляторов может эффективно работать в режиме обработки ступенчатых входных воздействий.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Никулин Е.Ф. Основы теории автоматического управления. Частотные методы анализа и синтеза систем. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 631 с.

[2] Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. СТА, 2006. № 4. С. 66–74.

[3] Шляйхер М. Техника автоматического регулирования для практиков. - Москва: ЛУМО, 2006. 273 с.

[4] Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. Пер. с англ. М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. 832 с.

[5] Справочные материалы по ПИД-регулятору в среде Simulink. Mathworks Inc. 2015. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/sref/pidcontroller.html>.

[6] Ротач В.Я. Теория автоматического управления: учебник для ВУЗов – 5ое издание. перераб. и доп. М.: Издательский дом МЭИ, 2008.

[7] Земцов Н.С., Французова Г.А. Синтез ПИД регулятора для системы управления прямоточным котлом. Мехатроника, автоматизация, управление. 2015. Т.16. № 9. С 631–636.

[8] Ефимов С.В., Замятин С.В., Гайворонский С.А. Синтез ПИД-регулятора с учетом расположения нулей и полюсов системы автоматического регулирования. Известия Том. политех. ун-та. 2010. Т.317. № 5. С. 102–107.

[9] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Taichenachev A.V., Semibalamut V.M. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 670–676.

[10] Востриков А.С. Проблема синтеза регуляторов для систем автоматизации: состояние и перспективы. Автометрия. 2010. Т.46. № 2(37). С. 3–19.

[11] Востриков А.С., Французова Г.А. Синтез ПИД-регулятора для нелинейных нестационарных объектов. Автометрия. 2015. №5. С. 53–60.

[12] Kotova E. P., Frantsuzova G. A. Application PI2D controller in automatic control systems. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 692–695.

[13] Жмудь В.А., Загорин А.Н. Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления. Автоматика и программная инженерия, 2013. № 1 (3). С. 30–36.

[14] Сидорова А.А., Малышенко А.М. Анализ эффективности алгоритмов автоматической настройки адаптивных промышленных ПИД-регуляторов. Известия Томского политехнического университета. 2011. Т.318, №5, С. 110–115.

[15] Французова Г.А., Земцов Н.С. Расчет параметров робастного ПИД-регулятора на основе метода локализации. Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника, 2013. Т. 13, № 4. С. 134–138.

[16] Востриков А.С., Уткин В.И., Французова Г.А. Системы с производной вектора состояния в управлении. Автоматика и телемеханика, 1982. № 3. С. 22–25.

[17] Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2007. 252 с.

[18] Французова Г.А., Толстоконева Е.П., Шилкова Н.Ю. Сравнительный анализ возможностей типовых регуляторов и регуляторов по методу локализации. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 29–34.

[19] Французова Г.А. Синтез двухконтурной астатической системы экстремального регулирования на основе принципа локализации. Сибирский журнал промышленной математики. 2004. Т. VII. № 1. С. 145–150.

[20] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. М.: Юрайт, 2017.

- [21] Жмудь В.А., Ядрышников О. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
- [22] Воевода А.А., Жмудь В.А. Астатическое управление объектами с нестационарными матричными передаточными функциями методом приближенного обращения функциональных комплексных матриц. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 2. С. 3–8.
- [23] Васильев В.А., Воевода А.А., Жмудь В.А., Хасуонех В.А. Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 4. С. 3–10.
- [24] Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. Динамика мехатронных систем. Учебное пособие. Новосибирск, 2014.
- [25] Востриков А.С., Воевода А.А., Жмудь В.А. Эффект понижения порядка системы при управлении по методу разделения движений. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 3. С. 3–13.
- [26] Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. Modern Key Technologies in Automatics: Structures and Numerical Optimization of Regulators. В сб.: Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.
- [27] Жмудь В.А., Семибаламут В.М., Ишимцев Р.Ю. Регулятор доля системы с обратной связью. Патент на изобретение RUS 2368933 17.03.2008.
- [28] Жмудь В.А. О методах расчета ПИД-регуляторов. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 2 (4). С. 118–124.
- [29] Жмудь В.А., Семибаламут В.М. Регулятор доля систем с обратной связью. Патент на полезную модель RUS 76719 04.03.2008.



**Галина Александровна Французова** – д.т.н., профессор кафедры автоматика Новосибирского государственного технического университета.

630073, Новосибирск,  
пр. Карла Маркса, 20

**E-mail:** [frants@ac.cs.nstu.ru](mailto:frants@ac.cs.nstu.ru).

Статья получена 10 марта 2018 г.

## Robust Systems Synthesis with PI2D-controller for Nonlinear Objects with Variable Parameters

G.A.Frantsuzova

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

*Annotation:* A PID-controller modification by means of an additional differentiation channel is considered in this paper. This modification allows us to extend the typical controller application to a class of the nonlinear second-order plants with time-variable parameters. As a result, we obtain a linear controller with double differentiation and it is usually called a PI2D controller. In this paper, we propose to transfer the differential components to the feedback channel. This allows us to eliminate the  $\delta$ -similar control throws in the stabilization systems with such controller. It is shown that the PI2D-controller components distribution results in the appearance of the two control loops in the closed system, and each circuit can be calculated separately. The inner circuit contains the nonlinear control plant, proportional and two differential controller components. Only its integral component remains in the outer control loop. In accordance with the received system structure, the calculating controller procedure for a second-order nonlinear plant consists of the two stages. The inner loop corresponds to the system based on the localization method, therefore, at the first stage, it is recommended to use the known relationships of this approach for a calculating the proportional component coefficient. It is shown that in this case the inner loop behavior corresponds to a linear equation that determines the controller differential components. As a result, the outer control loop is also linear so we can apply the modal approach in the second step for the remaining controller parameters calculating and to form a given root distribution in the closed system. It is shown that the PI2D controller calculated according to this procedure is robust. As a result, this approach makes it possible to stabilize the second-order nonlinear non-stationary plant under the external uncontrolled disturbances action. The numerical simulation results in MatLab illustrate the main system properties.

*Key words:* PI2D-controller, non-linear object, localization method, robust system.

### REFERENCES

- [1] Nikulin Ye.F. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Chastotnyye metody analiza i sinteza sistem. SPb: BKHV–Peterburg, 2004. 631 s.
- [2] Denisenko V.V. PID-regulyatory: printsipy postroyeniya i modifikatsii. STA, 2006. № 4. S. 66–74.
- [3] Shlyaykher M. Tekhnika avtomaticheskogo regulirovaniya dlya praktikov. - Moskva: JUMO, 2006. 273 s.

- [4] Dorf R., Bishop R. *Sovremennyye sistemy upravleniya*. Per. s angl. M.: Laboratoriya bazovykh znaniy, 2002. 832 s.
- [5] *Spravochnyye materialy po PID-regulyatoru v srede Simulink*. Mathworks Inc. 2015. URL: <http://www.mathworks.com/help/simulink/slref/pidcontroller.html>.
- [6] Rotach V.YA. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: uchebnik dlya VUZov – 5oye izdaniye. pererab. i dop.* M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2008.
- [7] Zemtsov N.S., Frantsuzova G.A. *Sintez PID regulyatora dlya sistemy upravleniya pryamotokhnym kotlom*. Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye. 2015. T.16. № 9. S. 631–636.
- [8] Yefimov S.V., Zamyatin S.V., Gayvoronskiy S.A. *Sintez PID-regulyatora s uchedom raspolozheniya nuley i polyusov sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya*. Izvestiya Tom. politekh. un-ta. 2010. T.317. № 5. S. 102–107.
- [9] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Taichenachev A.V., Semibalamut V.M. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 670–676.
- [10] Vostrikov A.S. Problema sinteza regulyatorov dlya sistem avtomatiki: sostoyaniye i perspektivy. *Avtometriya*. 2010. T.46. № 2(37). S. 3–19.
- [11] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Sintez PID-regulyatora dlya nelineynykh nestatsionarnykh ob'yektov*. *Avtometriya*. 2015. №5. S. 53–60.
- [12] Kotova E. P., Frantsuzova G. A. Application PI2D controller in automatic control systems. Intern. Siberian conf. on control and communications (SIBCON), Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana. 2017. p. 692–695.
- [13] Zhmud' V.A., Zavorin A.N. Drobno-stepennyye PID-regulyatory i puti ikh uproshcheniya s povysheniyem effektivnosti upravleniya. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*, 2013. № 1 (3). S. 30–36.
- [14] Sidorova A.A., Malysenko A.M. Analiz effektivnosti algoritmov avtomaticheskoy nastroyki adaptivnykh promyshlennykh PID-regulyatorov. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta*. 2011. T.318, №5, S. 110–115.
- [15] Frantsuzova G.A., Zemtsov N.S. Raschet parametrov robastnogo PID-regulyatora na osnove metoda lokalizatsii. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta*. Seriya: Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika, 2013. T. 13, № 4. S. 134–138.
- [15] Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. *Sistemy s proizvodnoy vektora sostoyaniya v upravlenii*. *Avtomatika i telemekhanika*, 1982. № 3. S. 22–25.
- [16] Vostrikov A.S. *Sintez sistem regulirovaniya metodom lokalizatsii*. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2007. 252 s.
- [17] Frantsuzova G.A., Tolstokoneva Ye.P., Shilkova N.YU. *Sravnitel'nyy analiz vozmozhnostey tipovykh regulyatorov i regulyatorov po metodu lokalizatsii*. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2015. №1 (11). S. 29–34.
- [18] Frantsuzova G.A. *Sintez dvukhkoturnoy astaticheskoy sistemy ekstremalnogo regulirovaniya na osnove printsipa lokalizatsii*. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki*. 2004. T. VII. № 1. S. 145–150.
- [19] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. *Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya*. M.: Yurayt, 2017.
- [20] Zhmud V.A., Yadryshnikov O. *Chislennaya optiizatsiya PID-regulyatorov s ispol'zovaniyem detektora pravil'nosti dvizheniya v tselevoy funktsii*. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2013. № 1 (3). S. 24–29.
- [21] Voyevoda A.A., Zhmud V.A. *Astaticheskoye upravleniye ob'yektami s nestatsionarnymi matrichnymi peredatochnymi funktsiyami metodom priblizhennogo obrashcheniya funktsional'nykh kompleksnykh matrits*. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 2. S. 3–8.
- [22] Vasil'yev V.A., Voyevoda A.A., Zhmud V.A., Khassuonekh V.A. *Tsifrovyye regulyatory: tselevyye funktsii nastroyki, vybor metoda integrirovaniya, apparatnaya realizatsiya*. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 4. S. 3–10.
- [23] Zhmud V.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. *Dinamika mekhatronnykh sistem*. *Uchebnoye posobiye*. Novosibirsk, 2014.
- [24] Vostrikov A.S., Voyevoda A.A., Zhmud V.A. *Effekt ponizheniya poryadka sistemy pri upravlenii po metodu razdeleniya dvizheniy*. *Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2005. № 3. S. 3–13.
- [25] Zhmud V., Yadryshnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. *Modern Key Technologies in Automatics: Structures and Numerical Optimization of Regulators*. V sb.: *Proceedings – 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012*. 2012. S. 6357804.
- [26] Zhmud V.A., Semibalamut V.M., Ishimtsev R.YU. *Regulyator dolya sistemy s obratnoy svyaz'yu*. Patent na izobreteniyе RUS 2368933 17.03.2008.
- [27] Zhmud V.A. *O metodakh rascheta PID-regulyatorov*. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2013. № 2 (4). S. 118–124.
- [28] Zhmud V.A., Semibalamut V.M. *Regulyator dolya sistem s obratnoy svyaz'yu*. Patent na poleznuyu model' RUS 76719 04.03.2008.



**Galina Alexandrovna Frantsuzova** – Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.  
**E-mail:** [frants@ac.cs.nstu.ru](mailto:frants@ac.cs.nstu.ru).  
 630073, Novosibirsk, Karl Marx Ave., 20

Paper was received 10 March 2018.

# Эффективное упрощение прецизионного синтезатора частоты

В.А. Жмудь<sup>1</sup>, Л.В. Димитров<sup>2</sup>, А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия.  
630090, просп. К. Маркса, д. 20.

<sup>2</sup>Технический университет Софии, София, Болгария. бул. „св. Климент Охридски“ 8, 1756

**Аннотация:** Синтезаторами частоты называют генераторы, частота которых управляется кодом. Подобные устройства изготавливаются различными фирмами, но остается актуальной разработка и синтезаторов с особыми свойствами, которыми не обладают серийные изделия. К таким свойствам относится сверхвысокая точность формирования частоты в зависимости только от кода, который задает требуемое ее значение и от частоты опорного генератора, которым, как правило, является водородный или иной стандарт частоты. Наиболее актуальны такие синтезаторы в задачах абсолютных частотных измерениях. Известные технических решения не отвечают специфическим требованиям. Необходимо отсутствие скачков сигнала при переключениях управляющего кода и плавность изменения фазы формируемого сигнала. Поэтому необходима разработка синтезаторов, обладающих этими свойствами. Точность таких синтезаторов повышается за счет добавления идентичных блоков. Однако эти блоки все же сложны, поэтому их добавление порождает сильное удорожание синтезатора. Данная статья предлагает новое решение указанной задачи путем разработки простых блоков уточнения. Упрощение достигается за счет отсутствия подсистем фазовой автоподстройки. Синтезатор содержит простейший блок формирования только двух опорных частот, несколько одинаковых блоков, содержащих синхронизованные коммутаторы, сумматоры частот, делители частоты и фильтры, причем технические требования ко всем этим узлам предельно просты. Высокие характеристики устройства в целом достигаются за счет организации алгоритма преобразования сигналов в нем. Выбранные соотношения частот предельно упрощают фильтры. Приведено теоретическое обоснование работоспособности всех технических решений, подтвержденное моделированием, также дана функциональная схема синтезатора.

**Ключевые слова:** синтезатор частоты, прецизионный генератор, частотная автоподстройка, фазовая автоподстройка, лазерные системы, управление частотой, управление фазой

## ВВЕДЕНИЕ

В задачах прецизионных измерений, в фундаментальной метрологии и в других задачах лазерной физики требуется чрезвычайно точная генерация сигнала заданной частоты, а также очень точная и плавная перестройка этой частоты с очень малым шагом [1–5]. Ранее эти задачи решались созданием высокостабильного управляемого генератора, но это не отвечало требованиям по стабильности частоты, хотя и обеспечивало достаточную плавность ее изменения. Современные устройства лазерной физики предъявляют к таким генераторам столь высокие требования, что они могут быть удовлетворены лишь путем цифрового синтеза частоты, что выполняется в частотных синтезаторах [6–13]. Это совершенно иной класс устройств, в которых частота генерации определяется не входным управляющим напряжением, а точно задается входным кодом. Изменение кода на единицу младшего разряда должно вызывать изменение частоты на минимальный шаг, причем это изменение должно происходить без резких скачков фазы. Это одно из наиболее существенных и труднодостижимых требований.

В НГТУ и Институте лазерной физики СО РАН разработан ряд устройств, в которых применяются подобные синтезаторы, и прогресс таких устройств в существенной мере зависит от прогресса в области создания синтезаторов частоты. Одна из последних версий такого синтезатора описана в статье [14]. Указанное устройство все же обладает некоторыми недостатками, для преодоления которых выполнены исследования, результаты которого описаны в данной статье. Эти исследования направлены на создание синтезатора частот, характеризующегося более плавными переходными процессами при переключении частоты, а также большей надежностью, простотой и лучшими возможностями для уменьшения шага управления, т.е. повышения точности.

## 1. ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ПРОТОТИПА

Прототип синтезатора выполнен по комбинационному принципу с диапазонно-кварцевой стабилизации частоты. Его функциональная схема показана на *Рис. 1*.

Устройство содержит образцовый кварцевый генератор частоты  $F_0 = 10 \text{ МГц}$ , несколько

счетчиков для получения кратных частот:  $F_1 = 1 \text{ MHz}$ ,  $F_2 = 6,25 \text{ kHz}$  и  $F_3 = 125 \text{ kHz}$ , интерфейс для ввода управляющего кода и ряд однотипных узлов суммирования и деления частот. При этом каждый такой узел содержит систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ), частотный сумматор и счетчик-делитель. Каждый узел осуществляет преобразование входной частоты в частоту с приращением, определяемым управляющим кодом. С этой целью ФАПЧ вырабатывает частоту по соотношению

$$F_{out} = F_{in} \times (140 + \Delta_i).$$

Здесь входная частота близка к значению  $F_2 = 6,25 \text{ kHz}$ . После умножения на 140

выходная частота близка к значению  $F = 875 \text{ kHz}$ . На выходе первого узла далее выходная частота складывается с частотой  $F_3 = 125 \text{ kHz}$ , в результате получается частота, близкая к значению  $F_1 = 1 \text{ MHz}$ , эта частота делится на 8. В результате получается частота, которая снова близка к исходному значению  $F_3 = 125 \text{ kHz}$ , но уже содержит полученную добавку по частоте, разделенную на 8. Добавка частоты исходно кратна значению  $F_2 = 6,25 \text{ kHz}$ , поскольку именно к этому значению подстраивается частота управляемого генератора, разделенная на соответствующий код, подаваемый в данный узел.

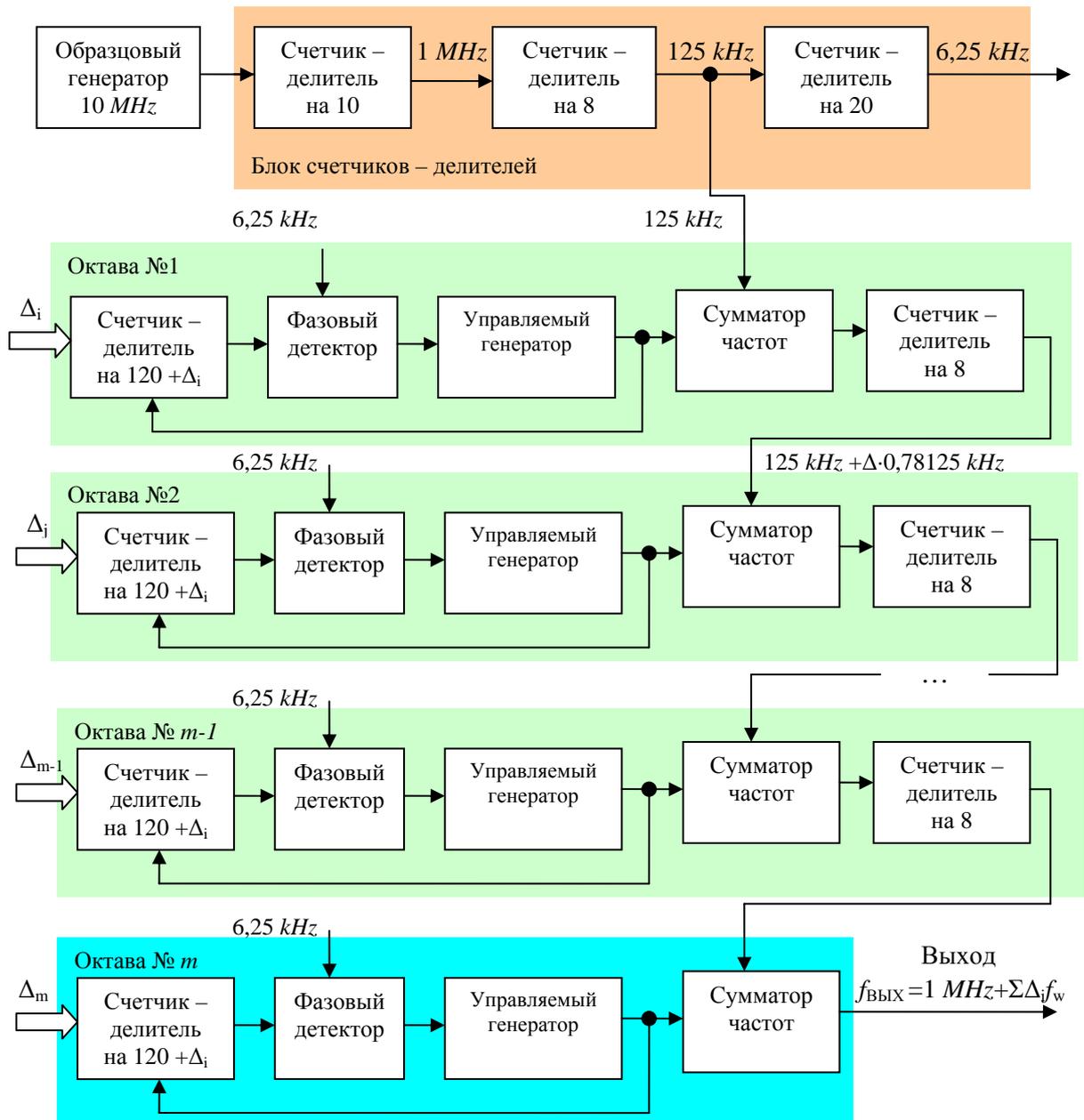


Рис. 1. Функциональная схема синтезатора

Таким образом, после первого преобразования из частоты  $F_1 = 1 \text{ MHz}$  формируется

частота  $F_{01} = 1 \text{ MHz} + x$ , где  $x$  принимает одно из следующих значений:

$$\begin{aligned}
 x_0 &= 0 \text{ кГц}, \\
 x_1 &= F_2 = 6,25 \text{ кГц}, \\
 x_2 &= 2F_2 = 12,5 \text{ кГц}, \\
 x_3 &= 3F_2 = 18,75 \text{ кГц}, \\
 x_4 &= 4F_2 = 25 \text{ кГц}, \\
 x_5 &= 5F_2 = 31,25 \text{ кГц}, \\
 x_6 &= 6F_2 = 37,5 \text{ кГц}, \\
 x_7 &= 7F_2 = 43,75 \text{ кГц}.
 \end{aligned}$$

После деления на 8 получается частота в 8 раз меньше, следовательно, и приращения частоты становятся в 8 раз меньше. Эта частота добавляется во втором преобразовании, где добавляется новое приращение, и так далее.

Сумматор частот представляет собой последовательное соединение перемножителя сигналов и фильтра верхних частот. Фильтр пропускает на свой выход суммарную частоту и не пропускает разностную частоту.

Таким образом, в результате суммирования частот формируется частота  $F_1 + x_i$  на первом узле, который можно назвать октавой. На выходе второй октавы формируется частота, равная  $F_1 + y_j + 0,1 x_i$ . На выходе третьей октавы формируется частота, равная  $F_1 + z_k + 0,01 y_j + 0,001 x_i$ , и т. д. Таким образом, каждая октава сдвигает полученное ранее приращение частоты в 8 раз вниз и добавляет новое приращение, сохраняя при этом значение несущей частоты  $F_1 = 1 \text{ МГц}$ . Это позволяет уменьшать величину шага установки частоты за счет добавления стандартных узлов. Все блоки октавы идентичны, что облегчает изготовление и отладку синтезатора.

Последний узел не содержит счетчика-делителя, поскольку в применениях к лазерным системам указанная несущая частота является той частотой, которая требуется.

Недостатком устройства является необходимость использования большого количества систем ФАПЧ. Эти ФАПЧ используются для формирования частоты, которая равна сумме выбранной несущей частоты и добавочной частоты, умноженной на дискретное значение добавки на текущем шаге, выбираемом из набора от 0 до 7.

## 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ДЛЯ НОВОГО ТЕХНИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Если вместо октавы использовать кварту, то добавка будет умножаться на значение от 0 до 3, при этом деление на счетчике-делителе следует осуществлять не в 8 раз, а только в 4 раза.

Такая модификация увеличила бы число идентичных блоков, но при этом существенно их упростила. Соответственно, если в рассмотренной схеме для получения частоты  $F_1 = 1 \text{ МГц}$  требуется сложить две частоты, представляющие собой, соответственно, семь восьмых и одну восьмую от требуемого значения (а после деления на 8 вновь получается одна восьмая), то при модификации требовалось бы складывать частоты, равные,

соответственно, трем четвертым и одной четвертой от требуемого значения частоты.

Можно развить это направление далее, и остановиться на двукратном увеличении частоты при сложении с последующим делением частоты лишь вдвое. В этом случае добавка на каждом шаге будет изменяться лишь от 0 до 1, т.е. требуется лишь выбор одной из двух фиксированных частот.

В предыдущем варианте синтезатора, показанном на Рис. 1, для формирования частоты с добавкой используется система ФАПЧ и счетчик-делитель. Безусловно, такой узел обладает большими возможностями, но он и более сложен. Если же требуется лишь выбор одной из двух частот, то вместо системы ФАПЧ можно использовать обычный переключатель частот. Произвольное переключение частоты, как правило, порождает скачок фазы в момент переключения, но при выбранных соотношениях используемых частот этот скачок может быть устранен. Действительно, например, если требуется переключить частоты, соотносящиеся между собой как 3:4, то можно отметить, что время от времени их фазы могут совпадать, например, при определенной исходной синхронизации через каждые три периода меньшей частоты они вновь будут находиться в одной и той же фазе, так как этот интервал будет в точности равен четырем периодам большей частоты.

На Рис. 2 показаны графики двух частот,  $F_{11} = 3f_0$  и  $F_{12} = 4f_0$ . Видно, что эти графики регулярно проходят через состояния одинаковых фаз. В данном случае эти точки соответствуют значению сигнала, равному нулю и близкому (хотя и не равному) значению производных этого сигнала. Если эти колебания не столь хорошо изначально синхронизованы, все же с периодичностью, равной четырем периодам частоты  $F_{11} = 3f_0$  или, что тождественно, трем периодам частоты  $F_{12} = 4f_0$ , повторяется такая ситуация, что значения этих сигналов совпадают, а производная сигнала с частотой  $F_{11}$  равна трем четвертым от производной сигнала с частотой  $F_{12}$ . Эти моменты можно выявить, анализируя эти сигналы. Схема управления переключениями может быть организована так, что переключения происходят только в эти моменты времени.

На Рис. 3 показан результат работы такой схемы переключения. На первой половине этого графика сигнал имеет частоту  $F_{12} = 4f_0$ , а на второй половине этого графика он имеет частоту  $F_{11} = 3f_0$ . Переключение происходит достаточно плавно, без скачков.

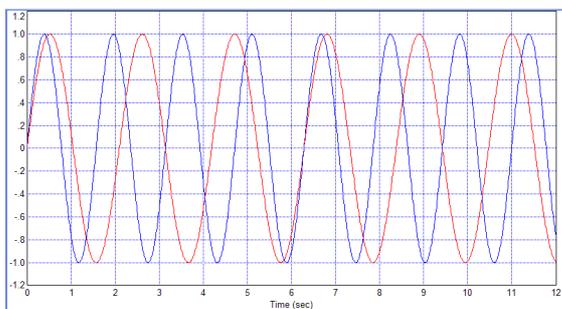


Рис. 2. Иллюстрация того факта, что частоты  $3f_0$  и  $4f_0$  регулярно проходят через состояние с одинаковой фазой

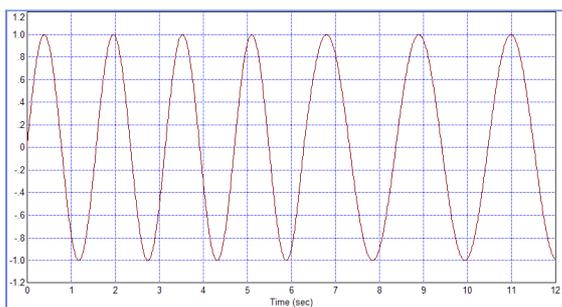


Рис. 3. Результат переключения сигналов в момент совпадения их фаз: скачок отсутствует

На Рис. 4 показан результат умножения этого сигнала на сигнал с частотой  $F_{12} = 4f_0$ , далее, на Рис. 5 показан такой же сигнал на большем интервале времени. Результат высокочастотной фильтрации этого сигнала показан на Рис. 6. Видно, что получаемый сигнал достаточно похож на гармонический сигнал, хотя его частота в момент переключения ( $t = 12\text{ s}$ ) скачком изменяется.

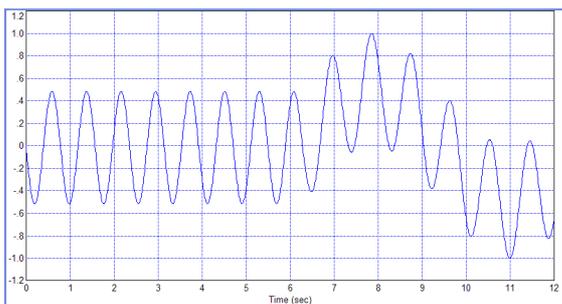


Рис. 4. Результат преобразования сигнала, показанного на Рис. 4, путем умножения его на сигнал, частота которого равна  $4f_0$

На Рис. 7 и 8 показаны аналогичные сигналы при суммировании сигнала, ранее показанного на Рис. 4, с сигналом с частотой  $F_{11} = 3f_0$ . Видно, что и в этом случае фильтрация осуществляется достаточно эффективно, проблем со скачками сигнала не возникает, хотя частота скачком изменяется в тот же момент времени. Таким образом, совокупность этих графиков показывает, что можно скачком переключать

частоту сигнала без появления скачков в форме этого сигнала, также можно достаточно эффективно преобразовывать полученный сигнал, а именно, складывать его с другим сигналом близкой частоты методом умножения с последующей высокочастотной фильтрацией.

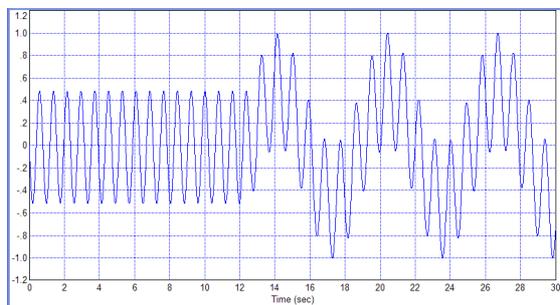


Рис. 5. Тот же сигнал, что на Рис. 4, за более продолжительный интервал времени

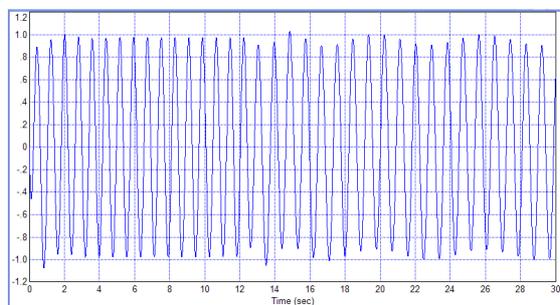


Рис. 6. Результат фильтрации сигнала, показанного на Рис. 5.

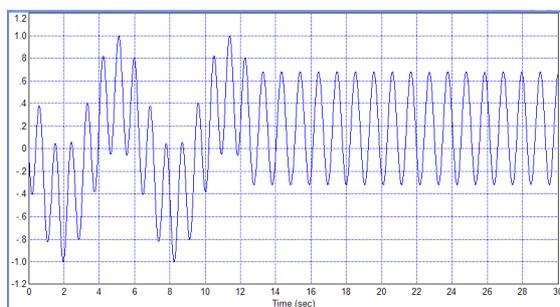


Рис. 7. Результат преобразования сигнала, показанного на Рис. 4, путем умножения его на сигнал, частота которого равна  $3f_0$

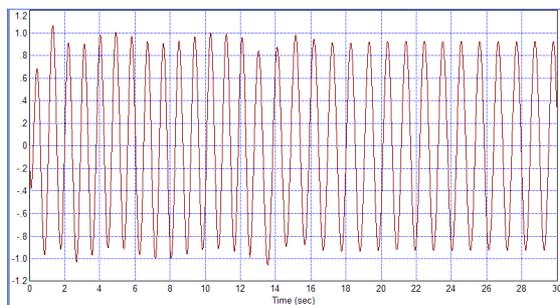


Рис. 8. Результат фильтрации сигнала, показанного на Рис. 7.

### 3. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ПРЕДЛАГАЕМОГО СИНТЕЗАТОРА ЧАСТОТ

На Рис. 9 показана функциональная схема предлагаемого синтезатора частот. Прибор содержит формирователь двух частот с кратностью 2:3. В данном случае формируются частоты 500 кГц и 750 кГц. Также прибор содержит требуемое количество блоков уточнения частот. Каждый такой блок содержит коммутатор, сумматор частот и счетчик-делитель на два и фильтр. При этом сумматор частот состоит из перемножителя частот, высокочастотного фильтра и оконечного каскада, обеспечивающий преобразование

сигнала в цифровой. Фильтр выходе каждого счетчика-делителя служит для преобразования прямоугольного сигнала в гармонический.

В первом блоке в зависимости от значения младшего разряда  $\Delta_1$  поступающего кода коммутатор подает на вход сумматора частоту 500 кГц, если этот разряд равен нулю, или 750 кГц, если этот разряд равен единице. Далее эта частота складывается с входной частотой 500 кГц, в результате получается частота, равная 1000 кГц, если код равен нулю, либо 1250 кГц, если код равен единице. Эта частота делится пополам, что дает  $F_{21} = 500 \text{ кГц} + \Delta_1 \cdot 125 \text{ кГц}$ .

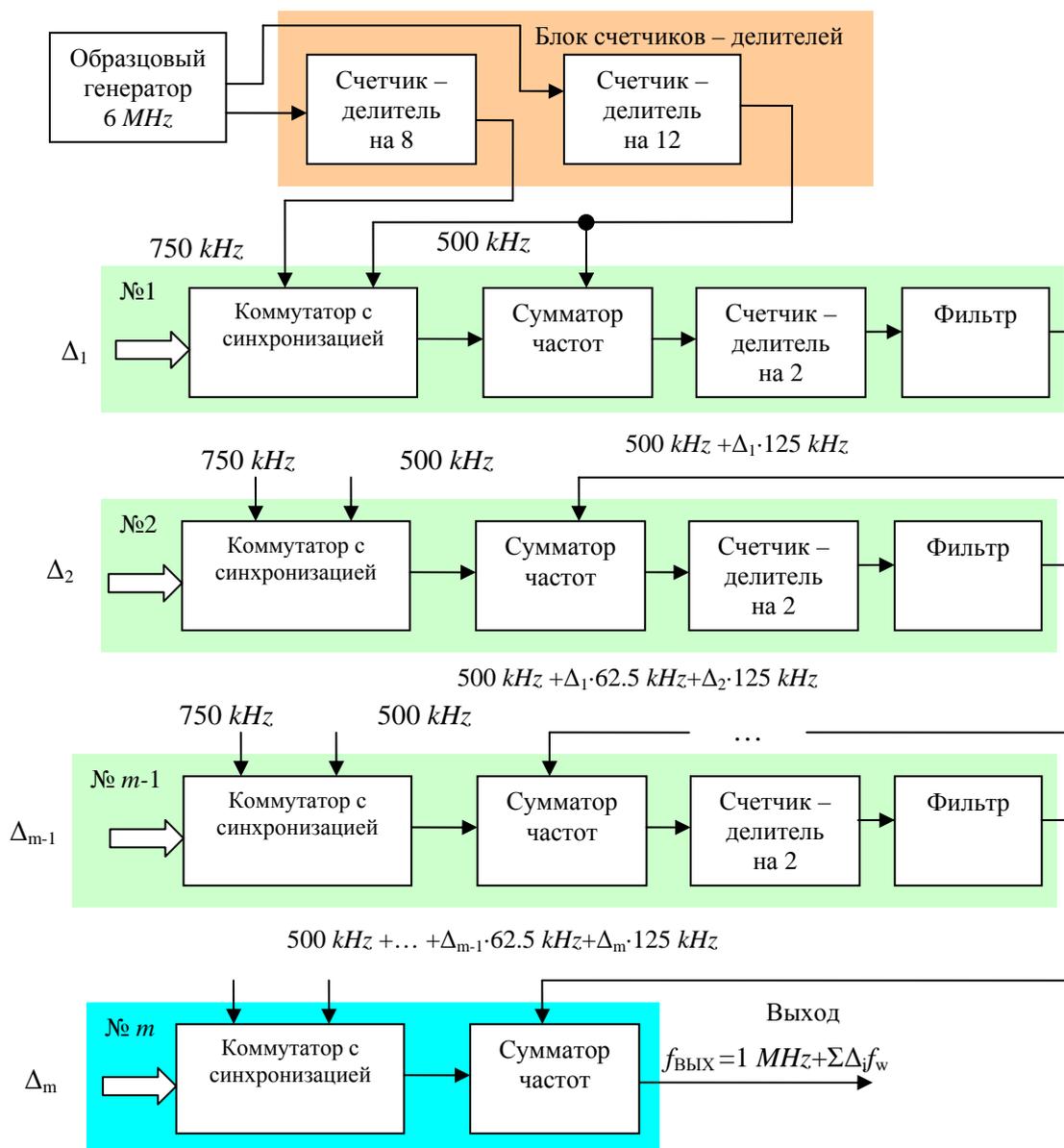


Рис. 9. Функциональная схема синтезатора

Следующий блок работает аналогично, но при сложении используется частота  $F_{21}$ . В результате на выходе этого блока формируется частота, равная  $F_{22} = 500 \text{ кГц} + \Delta_2 \cdot 125 \text{ кГц} + \Delta_1 \cdot 62,5 \text{ кГц}$ . Далее на следующем блоке эта частота опять используется как входная, в

результате чего формируется новая частота  $F_{23} = 500 \text{ кГц} + \Delta_3 \cdot 125 \text{ кГц} + \Delta_2 \cdot 62,5 \text{ кГц} + \Delta_1 \cdot 31,25 \text{ кГц}$ . Каждый последующий блок предыдущие добавки уменьшает по величине вдвое и добавляет собственную добавку частоты в зависимости от значения соответствующего

разряда, управляющего выходной частотой синтезатора.

Оконечный каскад не содержит счетчика-делителя, поскольку в лазерных системах требуется синтезатор на несущей частоте, равной  $1\text{ MHz}$ , что и получается в данном случае.

Очевидными достоинствами предлагаемого синтезатора частот являются следующие его особенности:

1. Отсутствие подсистем ФАПЧ, что существенно упрощает его схему.

2. Возможность сколь угодно уменьшать шаг управления, т.е. увеличивать точность формирования предписанной частоты путем добавления идентичных простейших подблоков.

3. Крайне простые условия для расчета всех фильтров.

4. Отсутствие необходимости отладки узлов при отлаженном прототипе одного узла (вследствие простоты и идентичности), что упрощает тиражирование и эксплуатацию, а также ремонт.

5. Предельно малое количество требуемых образцовых частот (всего две), которые легко могут быть получены из единственной частоты, и как следствие – возможность внешнего задания образцовой частоты.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Многokратное моделирование с различными исходными значениями кодов и при их переключениях на различные новые значения показали, что в сигналах, формируемых в промежуточных блоках, названных октавами, скачки фазы отсутствуют, при этом частота изменяется скачком к нужному значению. В выходных сигналах этих блоков частота изменяется более плавно, но фазовые скачки также отсутствуют. В итоговом сигнале также скачки фазы отсутствуют. Этот результат моделирования не является неожиданным, поскольку по самому принципу формирования сигналов скачки фазы исключены.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья предлагает новую схему прецизионного синтезатора частоты с сверхмалым шагом. Эта схема легко изготавливается, настраивается и тиражируется. Она более проста, чем все известные, а также ранее предложенные и разработанные, включая разработки авторов этой публикации. Схема, как и ее прототипы, позволяет наращивать точность (уменьшать шаг частотной сетки) за счет добавления идентичных узлов, но эти узлы предельно просты вследствие отсутствия подсистем ФАПЧ. Описанный синтезатор может применяться в системах прецизионной фазовой автоподстройки в составе аппаратуры обработки сигналов. Шаг управления может быть сколь угодно уменьшен. При этом формируемая частота характеризуется точ-

ностью и стабильностью образцового генератора. Это особенно важно при создании систем для фундаментальной лазерной метрологии (в абсолютных частотных измерениях).

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Bagaev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. Russian-German Laser Symposium. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. P. P12–P13.
- [2] Bagaev S.N., Belkin, A.M., Dychkov A.S. et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. 2000 Quantum Electronics. 30(7). P. 641–646.
- [3] Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. In collection: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98. Moscow, RUS, 1999. P. 310–318.
- [4] Zhmud V.A., Barmasov S.V., Gitel'son V.D. An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. 1999 Instruments and Experimental Techniques. 42(4), P. 551–557.
- [5] Zhmud V., Dimitrov L., Yadrishnikov O. Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, P. 739-744
- [6] Efimov A.S., Zhmud' V.A. A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. 1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). (2), P. 21-25.
- [7] DAC38RFxx Dual-Channel, Single-Ended, 14-Bit, 6- and 9-GSPS, RF-Sampling DAC with JESD204B Interface and On-Chip GSM PLL. <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SLASEF4&fileType=pdf>
- [8] Frequency Synthesizer Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesizer-introduction-types.php>
- [9] What is an RF Frequency Synthesizer: technology & types. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/frequency-synthesizer/synthesizer-types-introduction.php>
- [10] Ask the Applications Engineer – 30: PLL Synthesizers. Fox A. <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/pll-synthesizers.html>
- [11] M. Farazian et al., Fast Hopping Frequency Generation in Digital CMOS. Springer Science+Business Media New York 2013. Architectures for Frequency Synthesizers. URL: [http://www.springer.com/cda/content/document/cda\\_downloaddocument/9781461404897-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355443-p174127461](http://www.springer.com/cda/content/document/cda_downloaddocument/9781461404897-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355443-p174127461)
- [12] Lu T.-Y., Chen W.-Z. (2008) A 3-to-10GHz 14-band CMOS frequency synthesizer with spurs reduction for MB-OFDM UWB system. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 126–601, Feb 2008.
- [13] Liang C.-F., Liu S.-I., Chen Y.-H., Yang T.-Y., Ma G.-K. (2006) A 14-band frequency synthesizer for

MB-OFDM UWB application. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 428–437, Feb 2006.

- [14] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Ivoilov A. Yu. Precision Frequency Synthesizer. *Automatics & Software Engineering*. 2018. № 1 (23). P. 20–32. <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-1-2018-2.pdf>.



**Вадим Аркадьевич Жмудь** - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.

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

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



**Любомир Ванков Димитров** – Проректор Технического университета Софии (София, Болгария), доктор технических наук, профессор, почетный доктор НГТУ.

E-mail: [lubomir\\_dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg)

Бул. „св. Климент Охридски“ 8, 1756 Студентски Комплекс, София, Болгария



**Андрей Юрьевич Ивойлов** - аспирант кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: [iau13hv@mail.ru](mailto:iau13hv@mail.ru)

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20

Статья поступила в редакцию 12 февраля 2018 г.

## Effective Simplification of a Precision Frequency Synthesizer

V.A. Zhmud<sup>1</sup>, L.V. Dimitrov<sup>2</sup>, A.Yu. Ivoylov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. 630090, K. Marx, 20.

<sup>2</sup>Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria. Blvd. "St. Clement Ohridski" 8, 1756

*Abstract:* Frequency synthesizers are generators whose frequency is controlled by a code. Such devices are manufactured by different firms, but it remains relevant to develop and synthesizers with special properties that serial products do not possess. Such properties include ultra-high accuracy of frequency generation depending only on the code, which sets the required value of it and the frequency of the reference generator, which is usually hydrogen frequency standard or other. The most relevant are such synthesizers in problems of absolute frequency measurements. Known technical solutions do not meet specific requirements. It is necessary to avoid jumps in the signal when switching the control code and the smoothness of the phase change of the generated signal. Therefore, it is necessary to develop synthesizers with these properties. The accuracy of such synthesizers is enhanced by the addition of identical blocks. However, these blocks are still complex, so adding them generates a strong appreciation of the synthesizer. This article offers a new solution to this problem by developing simple blocks of refinement. Simplification is achieved due to the lack of phase-auto-tuning subsystems. The synthesizer contains the simplest block for the formation of only two reference frequencies, several identical blocks containing synchronized switches, frequency adders, frequency dividers and filters, the technical requirements to all these nodes being extremely simple. High characteristics of the device as a whole are achieved due to the organization of the signal conversion algorithm in it. The chosen frequency ratios greatly simplify the filters. The theoretical substantiation of the working capacity of all technical solutions, confirmed by modeling, is given, as well as the functional scheme of the synthesizer.

*Key words:* frequency synthesizer, precision oscillator, frequency autotuning, phase-locked loop, laser systems, frequency control, phase control

### REFERENCES

- [1] Bagaev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. *Russian-German Laser Symposium*. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. P. P12–P13.
- [2] Bagaev S.N., Belkin, A.M., Dychkov A.S. et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. *2000 Quantum Electronics*. 30(7), P. 641-646.
- [3] Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. In collection: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98*. Moscow, RUS, 1999. P. 310–318.
- [4] Zhmud V.A., Barmasov S.V., Gitel'son V.D. An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. *1999. Instruments and Experimental Techniques*. 42(4), P. 551–557.
- [5] Zhmud V., Dimitrov L., Yadrishnikov O. Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, P. 739–744.
- [6] Efimov, A.S., Zhmud', V.A. A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. *1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya)*. (2), P. 21–25.

- [7] DAC38RFxx Dual-Channel, Single-Ended, 14-Bit, 6- and 9-GSPS, RF-Sampling DAC With JESD204B Interface and On-Chip GSM PLL. <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SLASEF4&fileType=pdf>
- [8] Frequency Synthesiser Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesiser-introduction-types.php>
- [9] What is an RF Frequency Synthesiser: technology & types. URL: <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/frequency-synthesizer/synthesizer-types-introduction.php>
- [10] Ask the Applications Engineer – 30: PLL Synthesizers. Fox A. <http://www.analog.com/en/analog-dialogue/articles/pll-synthesizers.html>
- [11] M. Farazian et al., Fast Hopping Frequency Generation in Digital CMOS. Springer Science+Business Media New York 2013. Architectures for Frequency Synthesizers. URL: <http://www.springer.com/cda/content/document/cda-downloaddocument/9781461404897-c2.pdf?SGWID=0-0-45-1355443-p174127461>
- [12] Lu T-Y, Chen W-Z (2008) A 3-to-10GHz 14-band CMOS frequency synthesizer with spurs reduction for MB-OFDM UWB system. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 126–601, Feb 2008.
- [13] Liang C-F, Liu S-I, Chen Y-H, Yang T-Y, Ma G-K (2006) A 14-band frequency synthesizer for MB-OFDM UWB application. IEEE ISSCC digest of technical papers, P. 428–437, Feb 2006.
- [14] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Ivoilov A. Yu. Precision Frequency Synthesizer. Automatics & Software Engireery. 2018. № 1 (23). P. 20–32.

<http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-1-2018-2.pdf>.



**Vadim Arkadievich Zhmud** – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences. E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

630073, Novosibirsk, str. Prosp. K. Marksa, h. 20



**Lubomir Vankov Dimitrov** - Vice-Rector of the Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria), Doctor of Science, Professor, Honorary Doctor of the NSTU. E-mail: [lubomir\\_dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg)

Bul. "St. Kliment Ohridski" 8, 1756 Studentski Complex, Sofia, Bulgaria



**Andrey Yurievich Ivoylov** – PhD-student of Department of Automatics of NSTU. E-mail: [jau13hv@mail.ru](mailto:jau13hv@mail.ru)

630073, Novosibirsk, str. Prosp. K. Marksa, h. 20

Paper was received 12 February, 2018 г.

# Плавное управление прецизионным синтезатором частот

В.А. Жмудь<sup>1</sup>, Л.В. Димитров<sup>2</sup>, А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия.  
630090, просп. К. Маркса, д. 20.

<sup>2</sup>Технический университет Софии, София, Болгария. бул. „св. Климент Охридски“ 8, 1756

**Аннотация:** Прецизионный синтезатор частот является одной из важнейших компонент лазерных систем, которые широко применяются для создания высокостабильных эталонов частоты, а также для абсолютных частотных измерений. Хотя в этой области имеется множество готовых разработок, большинство из них не соответствуют высочайшим требованиям, предъявляемым к таким синтезаторам по части плавности переключения частоты. Плавность должна состоять в отсутствии скачков фазы или амплитуды. Современные разработки в этой области очень часто излишне сложны. Упрощение таких устройств при обеспечении указанных характеристик может быть обеспечено за счет отказа от фазовых подсистем автоподстройки в промежуточных узлах. В этом случае такие подсистемы можно заменить простыми коммутаторами различных частот в зависимости от значения частоты, которую требуется синтезировать. Это ранее не практиковалось, так как переключение сигналов разных частот неизбежно должно вызвать скачки в формируемом сигнале в момент переключения. Поэтому такой подход кажется противоречащим поставленной задаче. В данной статье исследуются пути решения задачи плавного переключения сигналов таким образом, чтобы на выходе переключателя частота претерпевала изменение, однако в формируемом сигнале не было бы скачков фазы. Дан анализ путей решения этой задачи, приводится функциональная схема для переключателя, обеспечивающего требуемое плавное переключение, надежная и корректная работа переключателя подтверждена приводимыми результатами моделирования.

**Ключевые слова:** синтезатор частоты, прецизионный генератор, частотная автоподстройка, фазовая автоподстройка, лазерные системы, управление частотой, управление фазой

## ВВЕДЕНИЕ

Одно из важнейших направлений использования лазерных систем состоит в использовании их в качестве источников наиболее стабильной частоты. В лазерных системах осуществляются многие преобразования оптических частот, включая фазовую привязку одного лазера к другому, получение разностных частот в радиочастотном диапазоне, управление этими частотами путем воздействия на частоту лазерного излучения и так далее. Одна из ключевых подзадач состоит в прецизионном управлении частотой излучения, что обеспечивается путем привязки получаемой разностной частоты к образцовой частоте, которую формирует синтезатор с предельно малым шагом управления [1–6]. Для решения этих задач изготавливаются синтезаторы [7–14]. Однако не каждый синтезатор может быть использован в такой задаче, а лишь такие, которые позволяют неограниченно уменьшать шаг управления за счет наращивания идентичных узлов [7, 14]. Самые последние разработки в этой области все же излишне сложны, поскольку требуют использования большого количества фазовых подсистем привязки частоты для промежуточных управляемых генераторов, которые используются в указанных идентичных узлах

[14]. Функциональную схему такого синтезатора можно в достаточной степени упростить, однако для этого требуется решение задачи переключения двух частот таким образом, чтобы в момент переключения не возникало никаких скачков в формируемом сигнале, т.е. чтобы сигнал на выходе переключателя в итоге плавно изменял свою частоту, но не изменял резко свое значение. Данная статья посвящена решению этой задачи.

## 1. УТОЧНЕНИЕ И ОБОСНОВАНИЕ ТРЕБОВАНИЙ К ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЮ

Упрощенная функциональная схема предлагаемого синтезатора показана на *Рис. 1*. В этом устройстве образцовый генератор формирует только две частоты, а именно:  $F_1 = 500 \text{ kHz}$  и  $F_2 = 750 \text{ kHz}$ . Кроме того, в нем имеется необходимое количество блоков уточнения частот. Каждый такой блок содержит коммутатор, представляющий собой проблему, которая обсуждается в данной статье, а также относительно простые узлы: сумматор частот и счетчик-делитель на два и фильтр. Сумматор частот состоит из перемножителя частот, высокочастотного фильтра и оконечного каскада (компаратора или триггера), обеспечивающий преобразование сигнала в цифровой. Фильтр выходе каждого счетчика-делителя

служит для преобразования прямоугольного сигнала в гармонический.

Принцип действия этого синтезатора можно понять из функциональной схемы.

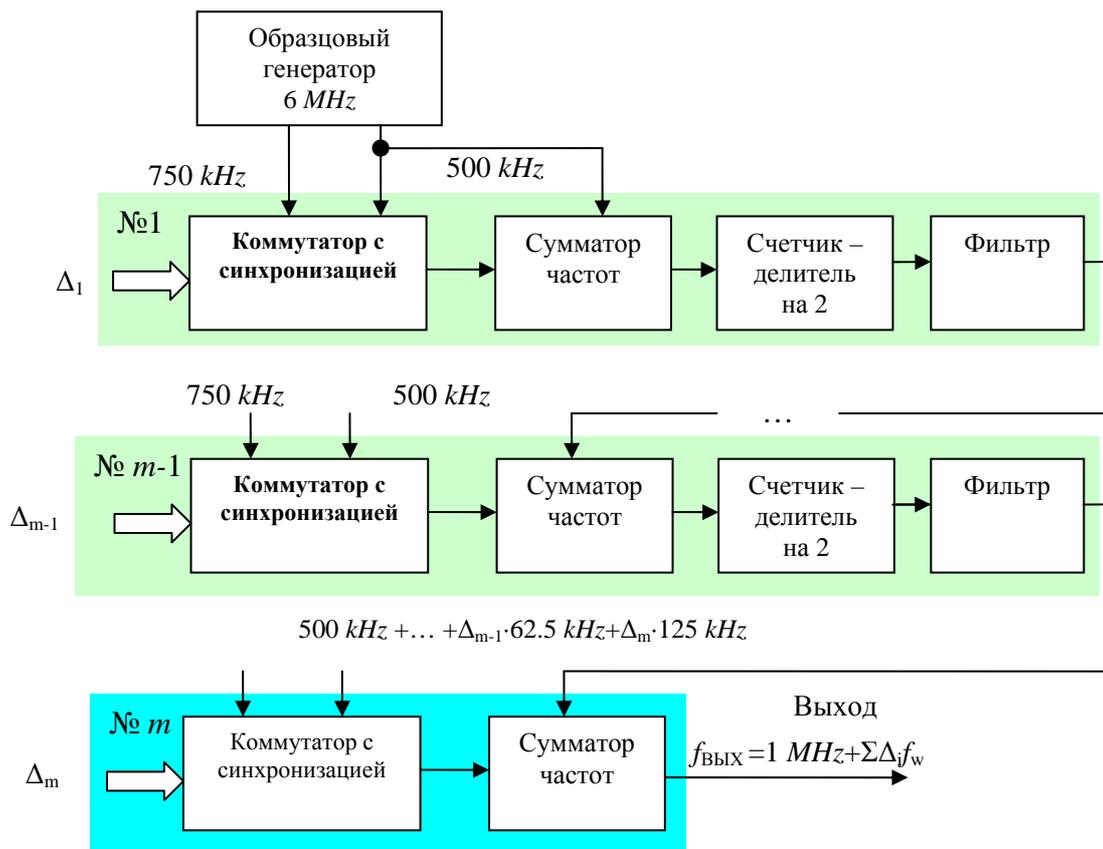


Рис. 1. Функциональная схема синтезатора

На Рис. 2 показана моделирования процесса схема преобразования частот в программе VisSim. При работе этой схемы каждая частота скачком изменяется с большего значения на меньшее значение, причем сначала срабатывает ключ, управляемый старшим разрядом кода, затем следующим, и так далее, в конце срабатывает ключ, управляемый младшим разрядом. Результат моделирования показан на Рис. 3, видно, что срабатывание ключа старшего разряда дает наибольший скачок, скачок от срабатывания каждого последующего разряда вдвое меньше скачка от предшествующего разряда. В зависимости входного кода может быть получена любая частота в интервале от  $F_{\min} = 1$  до  $F_{\max} = 1,5$  MHz.

Таким образом, задача синтеза частоты полностью решена за исключением подзадачи переключения сигналов двух частот таким образом, чтобы не было скачка фазы. При этом речь идет о переключении фиксированных частот  $F_1 = 500$  kHz и  $F_2 = 750$  kHz. Оба этих сигнала формируются от образцового генератора, что позволяет обеспечить следующие условия: эти сигналы имеют одинаковую амплитуду, каждый третий переход через ноль сигнала частоты  $F_1$  совпадает с каждым вторым переходом через ноль сигнала частоты  $F_2$ , как показано на Рис. 4. Можно

спроектировать коммутатор, который переключает сигналы только в эти моменты, а в другие моменты времени переключение запрещено.

Постановку задачи можно усложнить, установив такое требование, чтобы переключение происходило плавно даже в том случае, если изначальная синхронизация не осуществлена. Такое расширение функций коммутатора позволит переключать без скачков сигналы таких частот, которые не кратны, что позволит в дальнейшем не привязываться к первому условию, что дает дополнительные возможности по выбору частот. Это может упростить синтезатор при некоторых особых требованиях к нему.

Можно оценить, насколько часто будут совпадать фазы двух гармонических сигналов. Простые рассуждения приводят к выводу, что эта ситуация будет повторяться с периодом, соответствующим разностной частоте. Чем ближе частоты, которые приходится переключать, тем реже возникают моменты, когда переключение без скачков фазы возможно. Если частоты отличаются на 10%, то переключение возможно один раз на десять периодов меньшей частоты, что соответствует одиннадцати периодам большей частоты. Если частоты отличаются на 1%, переключение

возможно один раз на приблизительно сто периодов.

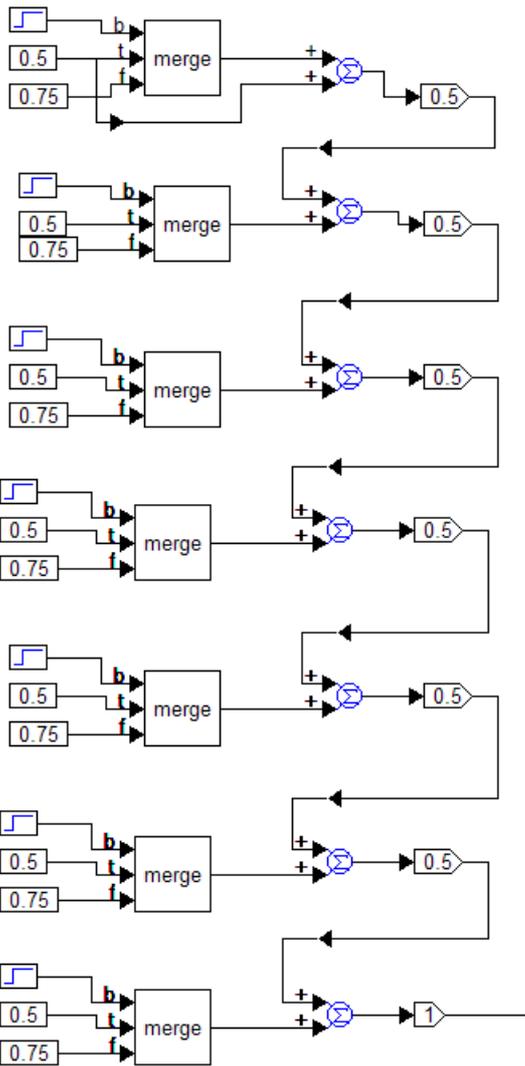


Рис. 2. Схема для моделирования процесса формирования нужной частоты в синтезаторе

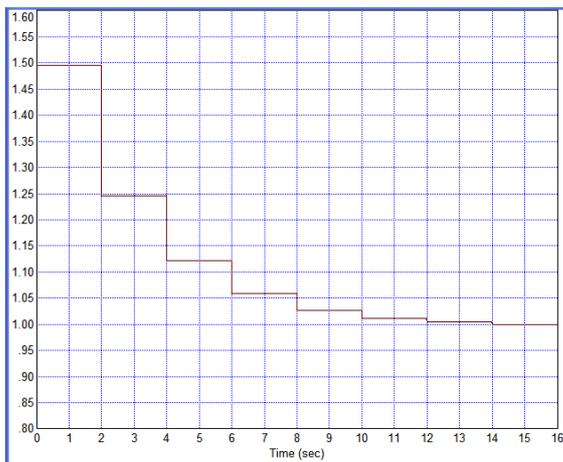


Рис. 3. Результат моделирования процесса формирования нужной частоты в синтезаторе

При выбранном соотношении частот возможность их переключения без фазовых скачков повторяется с интервалом, равным двум

периодам меньшей частоты, что равно трем периодам большей частоты, т.е. примерно через каждые 6,67 мс. Это можно считать достаточно высоким быстродействием. В системе управления лазерным спектрометром переключения частоты должны осуществляться реже, чем один раз в секунду. Таким образом, предлагаемое техническое решение более чем в 100 раз по быстродействию соответствует поставленной задаче.

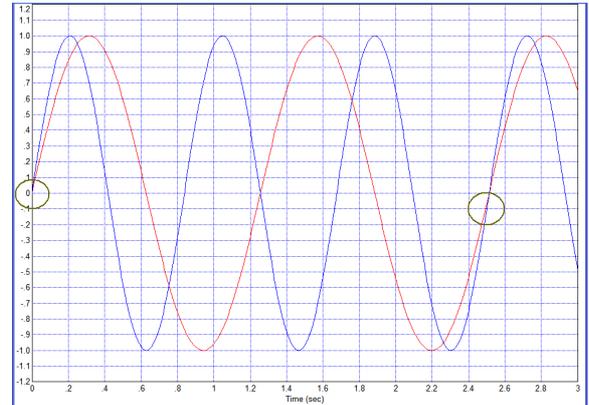


Рис. 4. Иллюстрация того факта, что при изначальной синхронности частот  $F_1 = 500 \text{ kHz}$  и  $F_2 = 750 \text{ kHz}$  ситуация синхронности регулярно повторяется (единицы времени на графике условные)

## 2. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБОВАНИЙ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫХ К ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЮ

Если первое требование выполнено и сигналы переключаемых частот синхронизированы изначально, как показано на Рис. 4, то логика срабатывания синтезатора должна обеспечить выявление таких состояний обоих этих сигналов, когда из значения одновременно близки к нулю, и значения их производных совпадают по знаку. Можно отметить, что при этом соотношения абсолютных значений этих производных соотносятся так же, как соотносятся их частоты, т.е. как два к трем.

Если сигналы не синхронизированы изначально, то это условие следует несколько видоизменить. Переключение следует осуществлять в тот момент, когда значения этих сигналов близки друг к другу, а значения их производных совпадают по знаку и соотносятся как два к трем. Устройство для распознавания этой ситуации и формирования переключающего сигнала показано на Рис. 5. Оно содержит вычислитель разности сигналов, вычислитель разности с коэффициентом, дифференцирующее устройство, два вычислителя абсолютной величины, сумматор с тремя входами, масштабные усилители и логический инвертор. Также на устройстве обозначены шины сигналов  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для того, чтобы использовать эти сигналы в других частях переключателя. На сумматор с тремя входами подается дополнительное смещение, равное  $-0,02$ . Это

позволяет формировать сигнал не строго в момент равенства нуля вычисляемого сигнала, а на несколько более длительном интервале, в

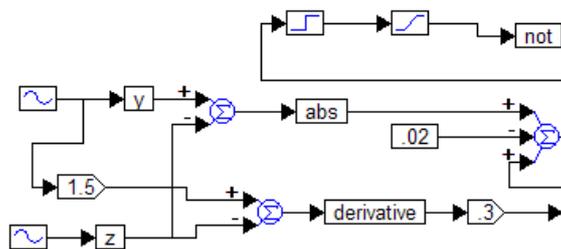


Рис. 5. Устройство для формирования переключающего сигнала

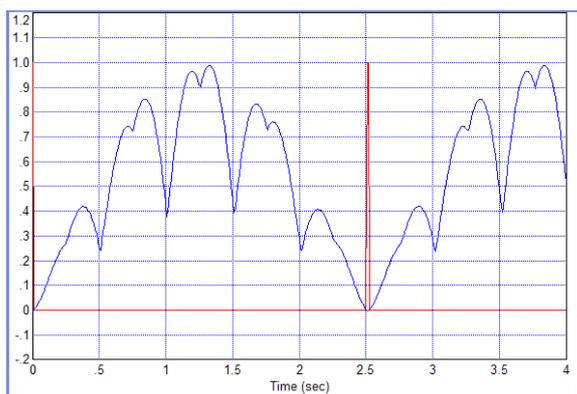


Рис. 6. Сигналы в устройстве по Рис. 5

Сигнал, формируемый в устройстве по Рис. 5, далее используется для синхронизации сигнала переключения. С этой целью может быть использован триггер с динамическим входом синхронизации, но в программе *VisSim* такого триггера не найдено, поэтому использовано устройство выборки-хранения. Схема этого устройства и формируемый сигнал показаны на Рис. 7. Далее сформированный сигнал, фронт которого совпадает с моментом равенства переключаемых сигналов и требуемого соотношения их производных, используется для переключения сигналов. На Рис. 8 показана схема переключателя и сигнал на его выходе. Видно, что в момент времени  $t = 2,5$  с (условное время), когда сформирован короткий импульс, показанный на Рис. 6, формируется фронт переключающего сигнала, показанного на Рис. 7. Именно в этот момент времени происходит переключение частоты сигнала.

Для чистоты эксперимента можем задать любой начальный сдвиг в любой из переключаемых сигналов, или в оба. Например, зададим в первый сигнал сдвиг, равный 1,2 с. В этом случае значения переключаемых сигналов будут совпадать не при нулевом их значении, а при другом, которое равно примерно 0,8 в момент времени примерно 2,6 с. Именно в этот момент

противном случае формируемый сигнал имел бы нулевую длительность. Получаемые сигналы показаны на Рис. 6.

схема осуществляет переключение. На Рис. 9 показана работа переключателя в оба направления. По предписанному сигналу переключатель должен был переключить частоту с большей на меньшую в момент времени, равный 1 с, а затем с меньшей частоты на большую в момент времени, равный 4,5 с. Схема по Рис. 7 сформировала сигнал управления, начинающийся в момент около 2,6 с, и обрывающийся в ноль в момент, равный примерно 5,2 с. Именно в эти моменты осуществлено переключение.

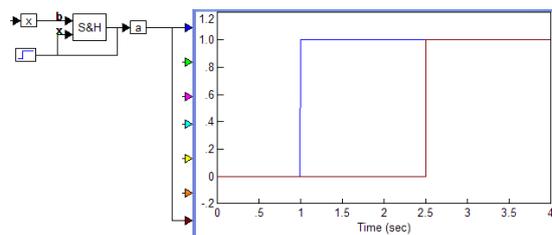


Рис. 7. Устройство синхронизации и сигналы, формируемые в нем

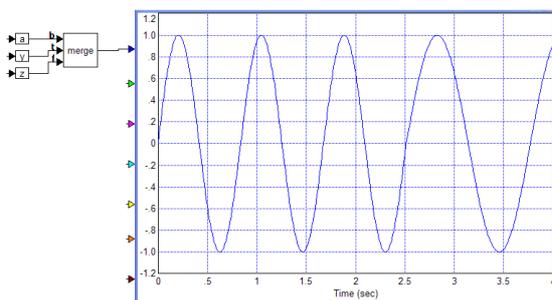


Рис. 8. Блок переключения и формируемый им сигнал

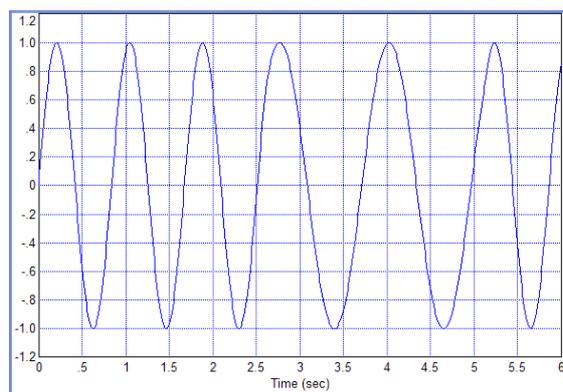


Рис. 9. Результат переключения сигнала от большей частоты к меньшей и обратно

## ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье предложен метод переключения гармонических сигналов фиксированной частоты для формирования сигнала с изменяющейся частотой. При этом требовалось отсутствие скачков фазы. Предложенный метод опробован моделированием, которое подтвердило его работоспособность и полное соответствие получаемым результатам тем требованиям, которые выдвигались при разработке этого устройства. Если частоты соотносятся как целые числа, то может иметь или не иметь место изначальная синхронизация коммутируемых сигналов. Моделирование подтвердило, что предложенное устройство успешно работает вне зависимости от такой синхронизации, т. е. такая синхронизация не требуется. Предложенное устройство может быть успешно применено в разработке прецизионных синтезаторов частот.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Статья обосновывает возможность создания новой схемы прецизионного синтезатора частоты со сверхмалым шагом. Наиболее острым вопросом создания такого устройства является плавное переключение сигналов, имеющих разную частоту. Показано, что при фиксированном соотношении частот эта задача может быть успешно решена даже если сигналы изначально не синхронизованы. Внешняя команда переключения в виде прямоугольного импульса лишь подготавливает переключение. Само переключение осуществляется в наиболее благоприятные моменты, когда сигналы совпадают по величине, а их производные имеют один и тот же знак, а соотношение между ними соответствует кратности переключаемых частот. Предложена структурная схема, которая собрана в программе *VisSim*, что позволило промоделировать работу переключателя и на получаемых сигналах продемонстрировать эффективность предложенной схемы.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. Russian-German Laser Symposium. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. P. P12–P13.

[2] Bagaev, S.N., Belkin, A.M., Dychkov, A.S. et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. 2000 Quantum Electronics. 30(7), P. 641-646.

[3] Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. In collection: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98. Moscow, RUS, 1999. P. 310–318.

[4] Bagayev, S.N., Belkin, A.M., Dychkov, A.S., High-stable compact Nd:YAG/<sup>127</sup>I<sub>2</sub>-laser system for precision measurements. 1996 Technical Digest - European Quantum Electronics Conference. P. 44.

[5] An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. Zhmud, V.A., Barmasov, S.V., Gitel'son, V.D. 1999 Instruments and Experimental Techniques. 42(4), P. 551–557.

[6] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, c. 739-744

[7] A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. Efimov, A.S., Zhmud', V.A. 1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). (2), P. 21-25.

[8] DAC38RFxx Dual-Channel, Single-Ended, 14-Bit, 6- and 9-GSPS, RF-Sampling DAC With JESD204B Interface and On-Chip GSM PLL. <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.tsp?baseLiteratureNumber=SLASEF4&fileType=pdf>

[9] Frequency Synthesiser Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesiser-introduction-types.php>

[10] Leenaerts D, van de Beek R, Van der Weide G, Bergervoet J, Harish K, Waite H, Zhang Y, Razzell C, Roovers R, Res P et al (2005) A SiGe BiCMOS 1ns fast hopping frequency synthesizer for UWB radio. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 202–593, Feb 2005.

[11] Lee J, Chiu D (2005) A 7-band 3–8 GHz frequency synthesizer with 1 ns bandswitching time in 0.18 μm CMOS technology. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 204–593, Feb 2005.

[12] Lu T-Y, Chen W-Z (2008) A 3-to-10GHz 14-band CMOS frequency synthesizer with spurs reduction for MB-OFDM UWB system. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 126–601, Feb 2008.

[13] Liang C-F, Liu S-I, Chen Y-H, Yang T-Y, Ma G-K (2006) A 14-band frequency synthesizer for MB-OFDM UWB application. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 428–437, Feb 2006.

[14] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Ivoilov A. Yu. Precision Frequency Synthesizer. Automatics & Software Engireery. 2018. № 1 (23). P. 20–32. <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-1-2018-2.pdf>.



**Вадим Аркадьевич Жмуд** - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.

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

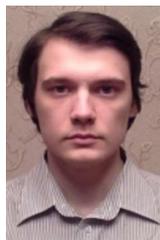
630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



**Любомир Ванков Димитров** –  
Проректор Технического  
университета Софии (София,  
Болгария), доктор технических  
наук, профессор, почетный доктор  
НГТУ.

E-mail: [lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg)

Бул. „св. Климент Охридски“ 8,  
1756 Студентски Комплекс,  
София, Болгария



**Андрей Юрьевич Ивойлов** -  
аспирант кафедры Автоматики  
НГТУ.

E-mail: [iau13hv@mail.ru](mailto:iau13hv@mail.ru)

630073, Новосибирск,  
просп. К.Маркса, д. 20

Статья поступила 15 мая 2018 г.

## Smooth Control of a Precision Frequency Synthesizer

V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, A. Yu. Ivoilov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia, str. Prospekt K. Marksa, h.20

Technical University of Sofia, Sofia. Str. Sv. Kliment Orkhidski 8, 1756

*Abstract:* A precision frequency synthesizer is one of the most important components of laser systems that are widely used to create highly stable frequency standards, as well as for absolute frequency measurements. Although there are many ready-made developments in this area, most of them do not meet the highest requirements for such synthesizers in terms of smooth frequency switching. Smoothness should consist in the absence of jumps of phase or amplitude. Modern developments in this area are often too complicated. Simplification of such devices while providing these characteristics can be achieved by avoiding the phase subsystems of auto-tuning in intermediate nodes. In this case, such subsystems can be replaced by simple commutators of different frequencies, depending on the value of the frequency that you want to synthesize. This was not previously practiced, since switching signals of different frequencies inevitably would cause jumps in the formed signal at the moment of switching. Therefore, this approach seems to contradict the task. In this paper, we investigate ways of solving the problem of smooth switching of signals in such a way that the frequency undergoes a change at the output of the switch, but there would be no phase jumps in the generated signal. An analysis of the ways of solving this problem is given, a functional diagram for the switch providing the required smooth switching is given, reliable and correct operation of the switch is confirmed by the results of the simulation.

*Key words:* frequency synthesizer, precision oscillator, frequency autotuning, phase-locked loop, laser systems, frequency control, phase control

### REFERENCES

- [1] Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov et al. Russian-German Laser Symposium. Novosibirsk, 27.06–1.07.97. Technical digest. p. P12–P13.
- [2] Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. Bagaev, S.N., Belkin, A.M., Dychkov, A.S. et al. 2000 Quantum Electronics. 30(7), c. 641-646
- [3] Absolute Frequency Measurements in Precision Laser Spectroscopy of Muonium. Bagayev S.N., Belkin A.M., Dychkov A.S. et al. In collection: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Proceedings of the 1998 Nonlinear Optical Phenomena and Coherent Optics in Information Technologies, ICONO-98. sponsors: Ministry Sci./Techn. Russian Fed., Russian Foundation for Basic Res., Ministry Ed. of the Russian Fed., Basic Optics/Spectrosc. Ed./Res.. Moscow, RUS, 1999. C. 310–318.
- [4] High-stable compact Nd:YAG/<sup>127</sup>I<sub>2</sub>-laser system for precision measurements. Bagayev, S.N., Belkin, A.M., Dychkov, A.S., 1996 Technical Digest - European Quantum Electronics Conference. c. 44
- [5] An electronic system for stabilizing the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. Zhmud, V.A., Barmasov, S.V., Gitel'son, V.D. 1999 Instruments and Experimental Techniques. 42(4), c. 551–557.
- [6] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20152014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings. 7040784, c. 739-744
- [7] A frequency synthesizer with the supersmall step for the systems of frequency and phase autotuning. Efimov, A.S., Zhmud', V.A. 1996 Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). (2), P. 21–25.
- [8] DAC38RFxx Dual-Channel, Single-Ended, 14-Bit, 6- and 9-GSPS, RF-Sampling DAC With JESD204B Interface and On-Chip GSM PLL. <http://www.ti.com/general/docs/lit/getliterature.jsp?baseLiteratureNumber=SLASEF4&fileType=pdf>
- [9] Frequency Synthesiser Types. URL: <http://www.radio-electronics.com/info/rf-technology-design/pll-synthesizers/frequency-synthesiser-introduction-types.php>
- [10] Leenaerts D, van de Beek R, Van der Weide G, Bergervoet J, Harish K, Waite H, Zhang Y, Razzell C, Roovers R, Res P et al (2005) A SiGe BiCMOS Ins fast hopping frequency synthesizer for UWB radio. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 202–593, Feb 2005.

- [11] Lee J, Chiu D (2005) A 7-band 3–8 GHz frequency synthesizer with 1 ns bandswitching time in 0.18  $\mu\text{m}$  CMOS technology. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 204–593, Feb 2005.
- [12] Lu T-Y, Chen W-Z (2008) A 3-to-10GHz 14-band CMOS frequency synthesizer with spurs reduction for MB-OFDM UWB system. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 126–601, Feb 2008.
- [13] Liang C-F, Liu S-I, Chen Y-H, Yang T-Y, Ma G-K (2006) A 14-band frequency synthesizer for MB-OFDM UWB application. IEEE ISSCC digest of technical papers, pp 428–437, Feb 2006.
- [14] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Ivoilov A. Yu. Precision Frequency Synthesizer. Automatics & Software Engireery. 2018. № 1 (23). P. 20–32. <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-1-2018-2.pdf>.



**Vadim Arkadievich Zhmud** – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.  
E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

630073, Novosibirsk,  
str. Prosp. K. Marksa, h. 20



**Lubomir Vankov Dimitrov** - Vice-Rector of the Technical University of Sofia (Sofia, Bulgaria), Doctor of Science, Professor, Honorary Doctor of the NSTU.

E-mail: [lubomir\\_dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg)

Bul. "St. Kliment Ohridski" 8, 1756 Studentski Complex, Sofia, Bulgaria



**Andrey Yurievich Ivoylov** – PhD-student of Department of Automatics of NSTU.

E-mail: [iau13hv@mail.ru](mailto:iau13hv@mail.ru)

630073, Novosibirsk,  
srt. Prosp. K. Marksa, h. 20

The paper was received on May 15, 2018.

## **II. Робототехника. Электроника. Программные средства и системы.**

### **Содержание раздела:**

- ◇ Ивойлов А.Ю., Жмудь В. А., Трубин В. Г., Рот Г. Получение желаемого качества переходных процессов системы стабилизации двухколесного балансирующего робота на основе численной оптимизации. ФГБОУ ВО «Новосибирский Государственный Технический Университет», Новосибирск, Россия. Университет Зигена, Зиген, Германия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 33–44.
- ◇ И.А. Гураков, Е.Ю. Костюченко, Новохрестова Д.И. Автоматизация выделения формант и поиска выравненных фрагментов фонограмм при подготовке к проведению фоноскопической экспертизы. Томский университет систем управления и радиоэлектроники. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 45–50.

# Получение желаемого качества переходных процессов системы стабилизации двухколесного балансирующего робота на основе численной оптимизации

А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup>, В. А. Жмудь<sup>1</sup>, В. Г. Трубин<sup>1</sup>, Г.Рот<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский Государственный Технический Университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Университет Зигена, Зиген, Германия

*Аннотация* – В статье решается задача обеспечения желаемого вида переходных процессов системы автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. Для задания формы переходных процессов необходимо выбрать распределение корней желаемого полинома динамики. Эта задача осложняется тем, что система работает с реальным устройством, в котором присутствуют такие нелинейности как трение и люфт приводов, ограничение на управляющее воздействие и др. Как правило, для задания распределения корней используются общие требования, такие как максимальный уровень перерегулирования и максимальная длительность переходного процесса. Эти требования определяют сектор на комплексной плоскости, в котором следует располагать корни. Однако в дополнение к этому также требуется задать распределение корней внутри этого сектора. В статье показано, что распределение корней в соответствии с биномом Ньютона не дает приемлемого результата. В этом случае нет возможности скорректировать форму переходного процесса в сторону увеличения быстродействия или уменьшения перерегулирования. В статье предложен метод получения требуемой формы переходного процесса, основанный на численной оптимизации. В основе метода лежит изменение вида стоимостной функции, используемой для процедуры оптимизации.

*Ключевые слова* – система автоматического управления, регулятор, численная оптимизация, настройка коэффициентов регулятора, робот, микроконтроллер, желаемое уравнение динамики

## I. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье рассматривается вопрос настройки коэффициентов регулятора системы автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. При расчете коэффициентов регулятора аналитически необходимо задать желаемое распределение корней системы. Данное распределение может быть задано, исходя из общих требований к качеству переходных процессов в системе, таких как максимальный уровень перерегулирования и минимальная длительность, которые задают сектор на комплексной плоскости, внутри которого следует выбирать корни. При этом вопрос выбора распределения внутри этого сектора остается открытым. В условиях нелинейностей, характерных для реальных устройств, эта задача становится еще более сложной. Наряду с аналитическими методами расчета регуляторов существуют различные неаналитические, среди которых можно выделить методы эмпирической настройки и методы численной оптимизации [1–11]. В данной работе предлагается методика настройки коэффициентов регулятора системы управления, основанная на методе численной оптимизации, позволяющая получить переходные процессы в системе, соответствующие тем или иным требованиям, предъявляемым к ней.

## II. ОПИСАНИЕ УСТРОЙСТВА

На *Рис. 1.* представлен внешний вид двухколесного балансирующего робота. Это устройство представляет собой платформу, на которой размещены платы с управляющей и силовой электроникой. К платформе жестко крепятся статоры двигателей постоянного тока. Вал каждого двигателя соединен со своим колесом. Основной задачей системы стабилизации данного устройства является поддержание вертикального положения робота путем вращения колес.

Структурная схема робота приведена на *Рис. 2.* Исполнительными механизмами устройства являются два сервомотора *Lego NXT*. Данные устройства представляют собой двигатели постоянного тока со встроенными редуктором и квадратурным энкодером. Энкодеры имеют разрешение 180 импульсов на оборот, что позволяет оценивать относительный угол поворота вала двигателя с точностью не менее двух градусов. Управление каждым сервомотором осуществляется с помощью мостовой схемы, основанной на четырех полевых транзисторах и микросхемах драйверов транзисторов. Данная схема позволяет осуществлять управление вращением двигателя с возможностью реверса.

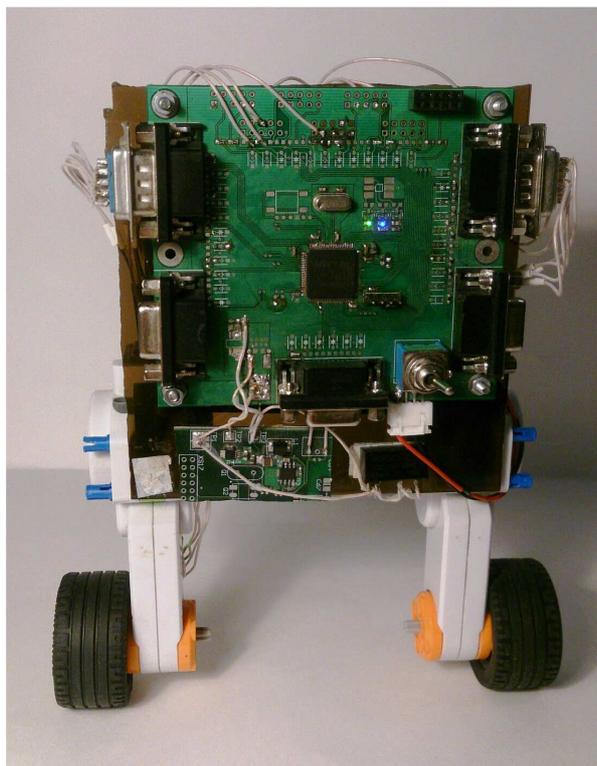


Рис. 1. Внешний вид устройства

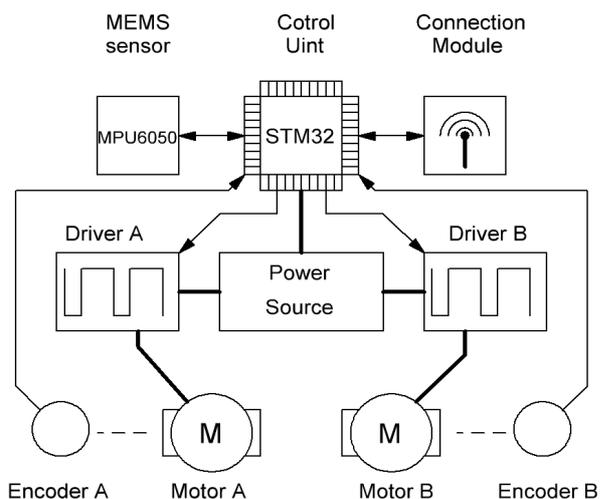


Рис. 2. Структурная схема робота

Для оценки угла отклонения робота от вертикали применяется измерительный модуль MPU6050, который содержит два трехосевых MEMS-датчика – акселерометр и гироскоп. На практике в системе стабилизации робота в настоящее время применяется только гироскоп [12]. Подробная информация об особенностях работы и применения модуля MPU6050 приведена в работах [13–14].

Ядром устройства является микроконтроллер STM32F205VET6 от STMicroelectronics. Управляющая программа микроконтроллера осуществляет сбор данных от датчиков системы и вычисляет управляющее воздействие системы стабилизации.

Помимо описанных блоков, устройство включает так же блоки проводной и беспроводной передачи данных. Питание устройства осуществляется от двух Li-Ion-аккумуляторов с суммарным напряжением 8,4 В.

### III. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Рассмотрим работу системы автоматической стабилизации двухколесного балансирующего робота. Структурная схема данной системы представлена на Рис. 3. Подробно обоснование выбора структуры системы и расчет ее регулятора приведены в статье [12]. Здесь же приведем лишь краткое описание принципа ее работы и итоговый вид уравнений. Выражения передаточных функций системы приведены ниже, а численные значения их параметров представлены в Таблице I.

$$W_\phi(p) = \frac{k_o p}{p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0}$$

$$W_\alpha(p) = k_\alpha \frac{p^2 + b_0}{p^2}$$

$$W_K(p) = \frac{K_d p^2 + K_p p + K_i}{p}$$

$$W_H(p) = \frac{H_p p^2 + H_i p + H_{ii}}{p^2}$$

Выбор такой структуры системы обусловлен необходимостью компенсировать недостаток датчика угловой скорости (МЭМС-гироскопа), называемый дрейфом нуля. Выражается этот недостаток в постепенном нарастании ошибки оценки угла наклона, что на структурной схеме отображено сигналом ошибки датчика  $Err_g$  и интегратором. С течением времени это приводит к потере устойчивости системы, если в ней не предусмотрен механизм компенсации этой ошибки. Представленная система позволяет это сделать. Действительно, если вывести передаточную функцию выхода системы относительно сигнала ошибки, получим следующее выражение:

$$W_e = - \frac{k_o k_a K(p) B(p)}{(A(p) + k_o K(p)) p^3 + k_o k_a H(p) B(p)}$$

где:

$$A(p) = p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0$$

$$B(p) = p^2 + b_0$$

$$H(p) = H_p p^2 + H_i p + H_{ii}$$

$$K(p) = K_d p^2 + K_p p + K_i$$

По завершении переходных процессов это выражение примет следующий вид:

$$W_e = - \frac{k_o k_a K_i b_0}{k_o k_a H_{ii} b_0} = \frac{K_i}{H_{ii}}$$

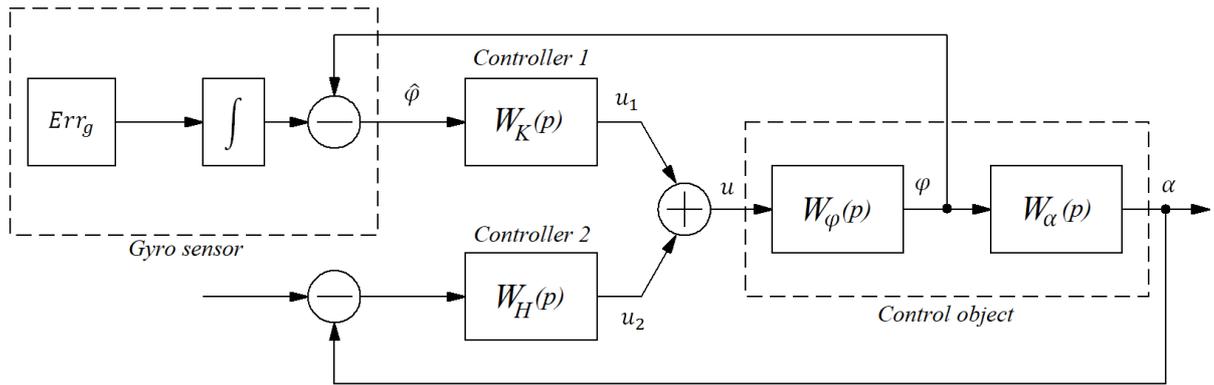


Рис 3. Структурная схема системы управления

Таблица 1  
Значения параметров передаточных функций

Параметр	Значение
$a_0$	-490
$a_1$	-52.3
$a_2$	9.9
$k_o$	-2.8
$b_0$	-49.5
$k_a$	-7.07

Следовательно, нарастающая с течением времени ошибка угла наклона компенсирована. Теоретически, при использовании идеального датчика угловой скорости для стабилизации системы было бы достаточно, если регулятор “Controller 2” был бы пропорциональным, а регулятор “Controller 1” имел бы тот же вид. Таким образом, порядок системы выше теоретического именно из-за необходимости компенсации дрейфа нуля гироскопа.

Выражения для расчета коэффициентов регуляторов системы приведены ниже.

$$a_2 + k_o K_d = a^*_5 \quad (1)$$

$$a_1 + k_o K_p + k_o k_a H_p = a^*_4 \quad (2)$$

$$a_0 + k_o K_i + k_o k_a H_i = a^*_3 \quad (3)$$

$$k_o k_a (H_{ii} + b_0 H_p) = a^*_2 \quad (4)$$

$$k_o k_a b_0 H_i = a^*_1 \quad (5)$$

$$k_o k_a b_0 H_{ii} = a^*_0 \quad (6)$$

Коэффициенты  $a^*_i$  представляют собой коэффициенты при степенях желаемого уравнения динамики системы:

$$A^*(p) = p^6 + \sum_{i=0}^5 a^*_i p^i \quad (7)$$

#### IV. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для расчета системы управления, описанной выше, необходимо выбрать распределение корней желаемого уравнения (7) и рассчитать значения

коэффициентов регуляторов. Однако в действительности выбор желаемого уравнения не является тривиальной задачей. Как правило, распределение корней этого уравнения выбирается исходя из общих ограничений к показателям качества процессов системы, таких как максимальный уровень перерегулирования и минимальное время переходного процесса. Эти параметры определяют сектор на комплексной плоскости, внутри которого следует располагать корни. Однако вопрос выбора распределения корней внутри этого сектора остается открытым. В литературе рекомендации по выбору желаемого уравнения практически не встречаются. Обоснование выбора распределения корней желаемого уравнения приведено, например, в работах [15–16]. На практике выбор желаемого распределения корней сопряжен с рядом трудностей, таких, как, например, присутствие нелинейностей в реальном объекте управления. При наличии таких нелинейностей, как ограничение на управляющее воздействие, сухое трение и механический зазор исполнительных механизмов, поведение системы может сильно отличаться от предсказываемого моделью, что осложняет выбор распределения корней. Часто в качестве желаемого выбирается распределение корней в виде бинома Ньютона, однако при этом получаемое качество процессов системы далеко от оптимального. При наличии же описанных выше нелинейностей реальный объект может стать неустойчивым, как показано в работе [12]. В рассматриваемой системе управления эмпирическим путем выбрано следующее распределение корней желаемого уравнения динамики:

$$p_1 = p_2 = -50; p_3 = p_4 = p_5 = p_6 = -1$$

что в соответствии с выражениями (1–6) дает значения коэффициентов регуляторов, которые представлены в Таблице 2. На Рис. 4–6 представлены графики переходных процессов системы при обработке начальных усло-

вий. Как видно из рисунков система компенсирует дрейф нуля гироскопа и обеспечивает устойчивость устройства. Однако переходные процессы в системе имеют достаточно высокую длительность.

Таблица 2

Коэффициенты регулятора исходной системы

Параметр	Значение
$K_i$	-4040
$K_p$	-1170
$K_d$	-33.6
$H_p$	-15.8
$H_i$	-10.3
$H_{ii}$	-2.55

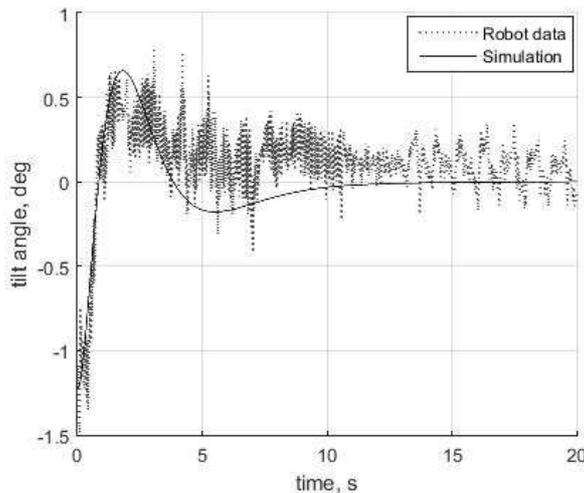


Рис. 4. Процесс угла наклона относительно вертикали в исходной системе

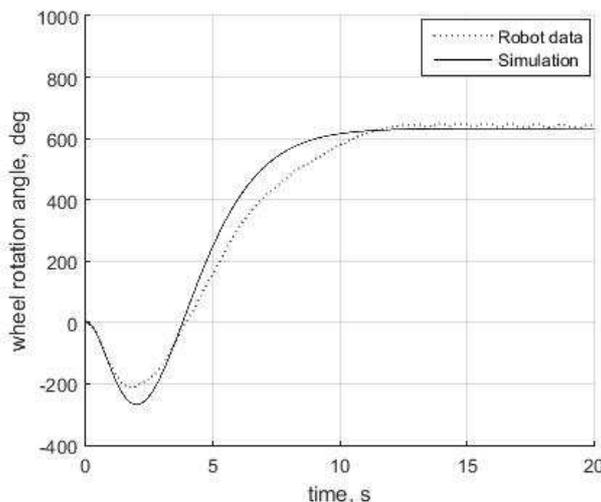


Рис. 5. Процесс угла поворота колеса исходной системы

Если, например, быстродействие системы является приоритетным требованием, то такие параметры системы могут быть неприемлемыми. В других случаях к системе могут предъявляться иные требования. Таким образом, задачу

исследования можно сформулировать следующим образом: необходимо предложить метод, позволяющий рассчитать коэффициенты регуляторов системы или настроить их, в соответствии с конкретными требованиями к системе. Решение этой задачи может быть достигнуто с одной стороны, обоснованным выбором желаемого уравнения динамики с последующим расчетом коэффициентов регулятора, с другой стороны – путем настройки рассчитанных заранее коэффициентов каким-либо способом.

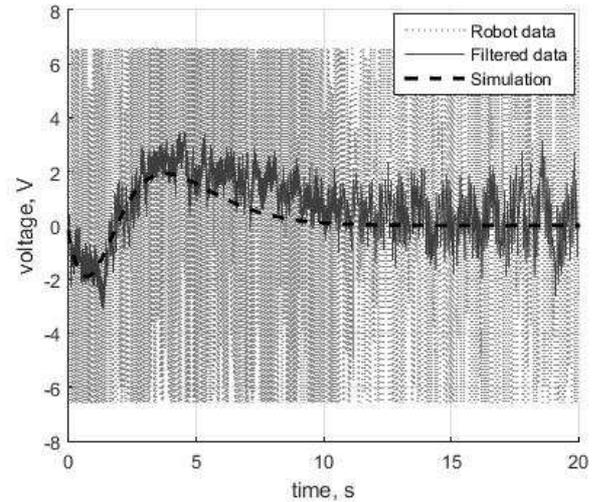


Рис. 6. Процесс напряжения в исходной системе

Для решения задачи любым из этих способов может быть применен метод численной оптимизации, как для выбора желаемого распределения корней, так и для настройки регулятора.

## V. О РАСПРЕДЕЛЕНИИ КОРНЕЙ

Рассмотрим систему, в которой задано распределение корней в виде бинома Ньютона. Рассчитаем коэффициенты регуляторов для различных значений корней. Результаты расчета приведены в Таблице 3. Проведем численное моделирование процессов в системе. В качестве примера будем исследовать реакцию системы на импульсное возмущающее воздействие:

$$M(t) = \begin{cases} 1, & t \leq 0.01c \\ 0, & t > 0.01c \end{cases} \quad (8)$$

Таблица 3

Коэффициенты по биному Ньютона

Значение	$p_i = -3$	$p_i = -5$	$p_i = -8$
$K_i$	-378	-1200	-5250
$K_p$	-75.8	-223	-843
$K_d$	-2.89	-7.18	-13.6
$H_p$	-1.25	-9.89	-68.1
$H_i$	-1.49	-19.1	-201
$H_{ii}$	-0.744	-15.9	-268

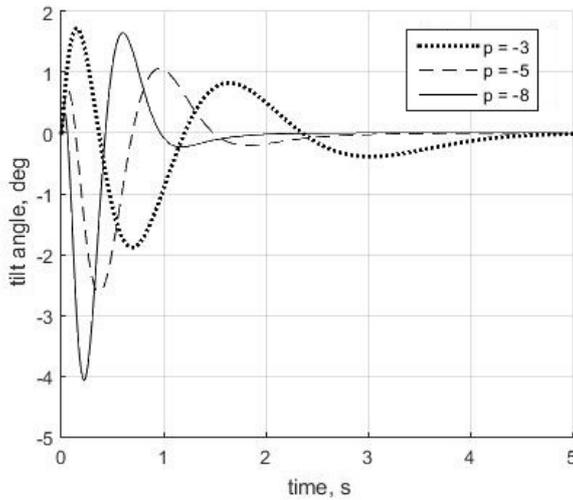


Рис. 7. Моделирование системы для случая бинорма Ньютона

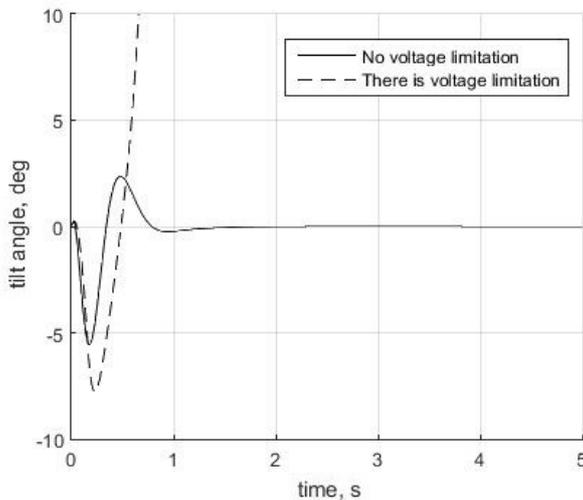


Рис. 8. Поведение системы при  $p_i = -10$  с ограничением и без ограничения управления

Такой вид воздействия соответствует действию возмущений на реальное устройство (удары, или «толчки»). Результаты моделирования представлены на Рис. 7. Отметим, что при меньших и больших значениях корней желаемого уравнения система, получаемая при моделировании, становится неустойчивой. При этом если убрать ограничение на управляющее воздействие, система, рассчитанная для больших значений корней, становится устойчивой, что отображает Рис. 8. В этом проявляется свойство данного вида нелинейности. Далее применим рассчитанные значения коэффициентов в реальном устройстве. На Рис. 9 и 10 представлен отклик робота на возмущающее воздействие и обработка им ненулевых начальных условий. Из рисунков видно, что хотя в целом тенденция процессов корректная (быстродействие увеличивается по мере увеличения значения корней системы) качество процессов в реальном устройстве не соответствует тому, что прогнозируется моделированием. Единственной приемлемой с оговорками системой можно

считать лишь систему, соответствующую значению корня  $p_i = -5$ . Таким образом, можно сделать следующие выводы:

- Распределение корней в виде бинорма Ньютона позволяет управлять лишь общим усилением системы, но не соотношением колебательности и быстродействия при заданном усилении.
- При малом значении общего усиления системы ( $p_i = -3$ ) в процессах реального устройства присутствуют значительные по величине автоколебания, устойчивость системы к возмущениям при этом невысока.
- При большом значении общего усиления системы начинает сказываться влияние ограничения на управляющее воздействие: в системе также появляются автоколебания, хотя и сохраняется высокая устойчивость.

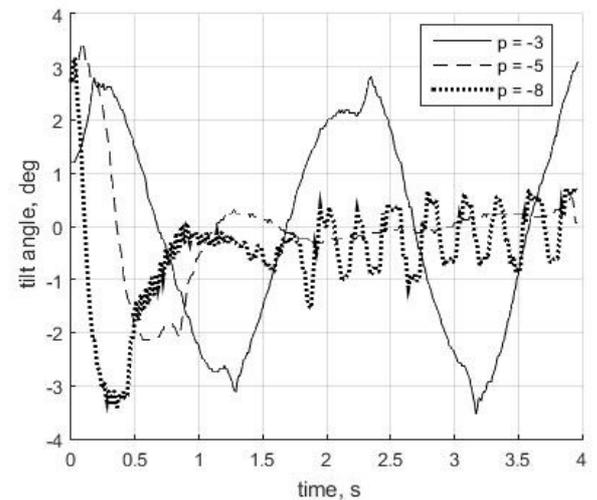


Рис. 9. Процессы в реальной системе с распределением корней по бинорму Ньютона: отработка начальных условий

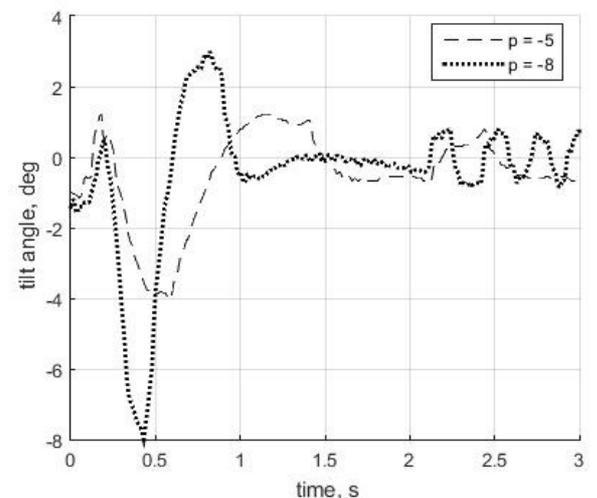


Рис. 10. Процессы в реальной системе с распределением корней по бинорму Ньютона: отработка возмущения

Таким образом, необходимо выбирать распределение корней более тщательно для получения лучшего качества процессов.

## VI. МЕТОД НАСТРОЙКИ КОЭФФИЦИЕНТОВ РЕГУЛЯТОРА

Альтернативой выбору распределения корней желаемого уравнения системы является настройка существующих значений коэффициентов регуляторов для получения приемлемого качества процессов в системе. Для настройки коэффициентов регулятора системы воспользуемся методом численной оптимизации в программе *VisSim*. Отметим, что в данном случае не требуется определить глобальный оптимум системы, необходимо лишь получить процессы приемлемого качества. В ходе моделирования так же будем исследовать отклик системы на возмущающее воздействие вида (8). Настройку коэффициентов регулятора будем выполнять в два этапа:

1. Определяем первые 4 коэффициента регулятора, полагая оставшиеся 2 коэффициента равными нулю. При этом датчик угловой скорости считаем идеальным (сигнал ошибки гироскопа равен нулю).
2. Определяем 2 оставшихся коэффициента регулятора с учетом наличия ошибки измерения угла наклона гироскопом.

### А. Этап 1

Для расчета значений коэффициентов регулятора, с которых начнется процедура оптимизации, воспользуемся упрощенной структурной схемой системы, представленной на рис. 11. Передаточная функция угла наклона работа относительно входа в данной системе имеет следующий вид:

$$\overline{W}_\varphi(p) = \frac{k_o(K_d p^2 + K_p p + K_i)}{p^3 + (a_2 + k_o K_d)p^2 + (a_1 + k_o K_p)p + (a_0 + k_o K_i)}$$

Выражения для расчета коэффициентов регулятора имеют следующий вид:

$$a_2 + k_o K_d = a^*_2$$

$$a_1 + k_o K_p = a^*_1$$

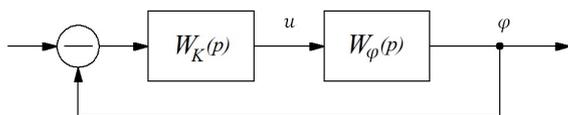


Рис. 11. Упрощенная система

$$a_0 + k_o K_i = a^*_0$$

где  $a^*_i$  коэффициенты при степенях полинома желаемого уравнения динамики. В качестве стартовых значений для процедуры оптимизации можно использовать распределение, соответствующее биному Ньютона. При этом значение пропорционального коэффициента регулятора “*Controller 2*” примем следующее:

$$H_p = \frac{K_d}{2}$$

Для проведения процедуры оптимизации необходимо задать стоимостную функцию системы. Минимизация значения этой функции есть цель оптимизации. Выберем вид стоимостной функции, описанный в работе [17]:

$$f(t) = \int |e(t)|^M t^N dt$$

где  $e(t)$  – ошибка системы,  $M$  и  $N$  целые показатели степени. Поскольку на более поздних стадиях переходного процесса ошибка системы вносит больший вклад в значение стоимостной функции, данный вид функции может применяться для получения более эффективных по быстрдействию процессов. Задавая различные значения показателей степеней  $M$  и  $N$ , можно изменять вид получаемых процессов в сторону большего быстрдействия или меньшей колебательности. В качестве ошибки системы  $e(t)$  выберем текущее значение угла наклона работа, поскольку обеспечение нулевого значения этого угла и есть цель работы системы стабилизации. При проведении оптимизации будем задавать различные значения показателей степеней  $M$  и  $N$ . Проведем численную оптимизацию системы программе *VisSim* в соответствии со схемой моделирования, представленной на Рис. 12. Результаты оптимизации представлены на Рис. 13–14. Значения коэффициентов регулятора, полученные при различных значениях параметров  $N$  и  $M$ , а также их начальные значения, приведены в Таблице 4.

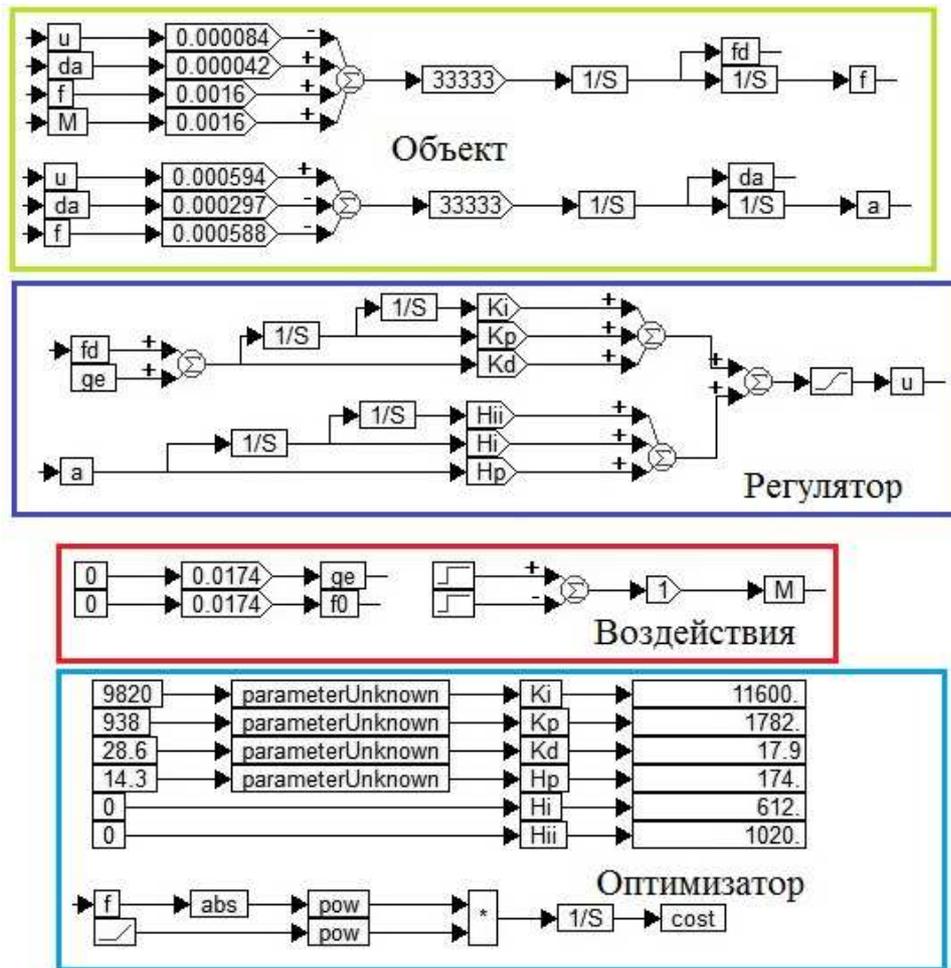


Рис. 12. Схема моделирования системы на этапе 1

Таблица 4

Результат настройки на Этапе 1

-	-	1	2	3	4	5
Система	Нач.	M=1, N=1	M=1, N=4	M=4, N=1	M=4, N=4	Модиф.
$K_i$	-9820	-4720	-4240	-36300	-6190	-3550
$K_p$	-983	-757	758	-104000	-583	-650
$K_d$	-28.6	-31.1	11.9	-481	-13.3	-14.2
$H_p$	-14.3	-39.1	54.6	0.126	-28.7	-22.3
$H_i$	0	0	0	0	0	0
$H_{ii}$	0	0	0	0	0	0

Отметим, что для случая  $M = 4$  и  $N = 1$  был получен некорректный результат, поскольку по завершении переходного процесса устройство продолжает перемещаться по поверхности, что демонстрирует Рис. 14. (угол поворота колеса нарастает с течением времени). Для решения данной проблемы выберем в качестве ошибки системы не текущее значение угла наклона, а текущее значение угловой скорости вращения колеса, и повторим процедуру оптимизации при  $M = 4$  и  $N = 1$ . Из рисунков видно, что наилучшей по быстрдействию из полученных при оптимизации систем является система 1, а наилучшей по уровню колебательности – система 5. Примем значения коэффициентов регуляторов этих систем и продолжим настройку

на этапе 2. Отметим, что хотя колебательность исходной системы ниже, чем в системе 5, в последней системе время переходного процесса существенно меньше, в то время как уровень колебательности незначительно выше, поэтому примем именно эту систему.

А. Этап 2

Для окончательной настройки коэффициентов регуляторов воспользуемся схемой оптимизации, представленной на Рис. 15. Основное отличие данной схемы от предыдущей состоит в том, что в эту систему введена ошибка измерения угла наклона гироскопом.

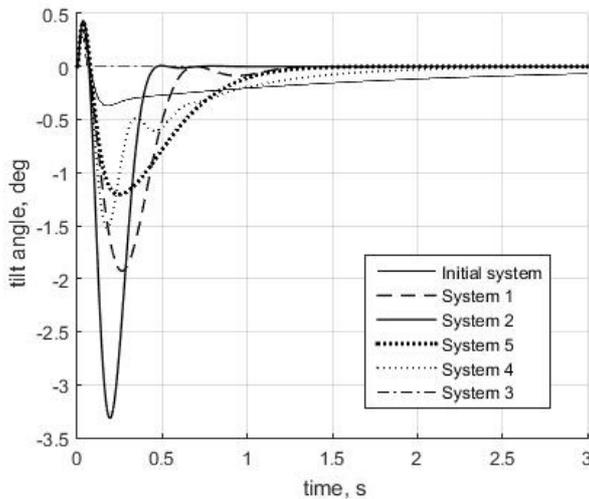


Рис. 13. Результат настройки на этапе 1: угол наклона

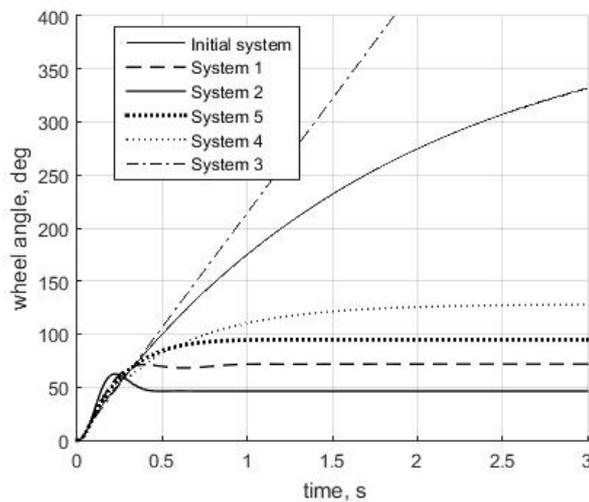


Рис. 14. Результат настройки на этапе 1: угол колеса.

В соответствии с этой схемой выполним настройку трех коэффициентов регулятора “Controller 2”. При этом в качестве начального значения коэффициента  $H_p$  примем значение, полученное на этапе 1. Начальные значения коэффициентов  $H_i$  и  $H_{ii}$  примем вдвое меньшими, чем  $H_p$ :

$$H_i = \frac{H_p}{2}$$

$$H_{ii} = \frac{H_p}{2}$$

На втором этапе процедуры настройки сохраним те значения параметров стоимостной функции  $M$  и  $N$ , при которых были получены коэффициенты регуляторов системы на этапе 1. Но при этом в качестве сигнала  $e(t)$  примем текущее значение угловой скорости вращения колеса. Результаты оптимизации представлены на Рис. 16 и 17. Значения коэффициентов регулятора, полученные при различных значениях параметров  $N$  и  $M$ , а также же исходные значения коэффициентов из работы [12], приведены в Таблице 5. Из рисунков видно, что процессы в системах с настроенными коэффициентами имеют более высокое быстродействие по сравнению с исходной системой. При этом система 5 при лучшем быстродействии имеет близкий к исходной системе уровень колебательности: первый пик имеет несколько большее значение, второй пик при этом чуть меньше.

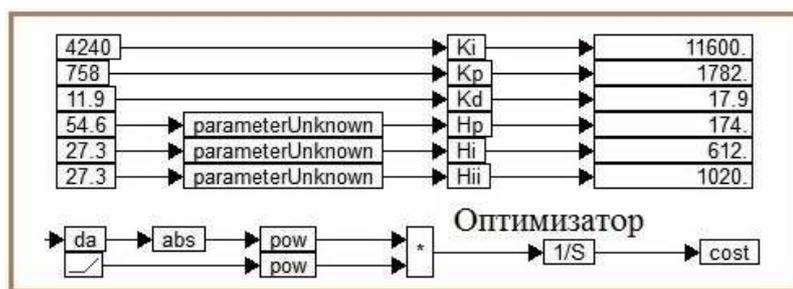


Рис. 15. Схема оптимизатора при моделировании системы на этапе 2; остальные блоки – без изменений

Таким образом, можно сделать вывод, что описанная методика позволяет получить более качественные процессы, по сравнению с полученными эмпирически. При этом методика позволяет получать более эффективные по быстродействию или по уровню колебательности процессы, в зависимости от конкретных требований к системе.

Таблица 5  
Результат настройки на Этапе 2

-	-	2	5
Система	Исходная	M=1, N=1	M=1, N=4
$K_i$	-4040	-4240	-3550
$K_p$	-1170	-758	-650
$K_d$	-33.6	-11.9	-14.2
$H_p$	-15.8	-35.4	-20.9
$H_i$	-10.3	-55.7	-22.6
$H_{ii}$	-2.55	-32.3	-9.48

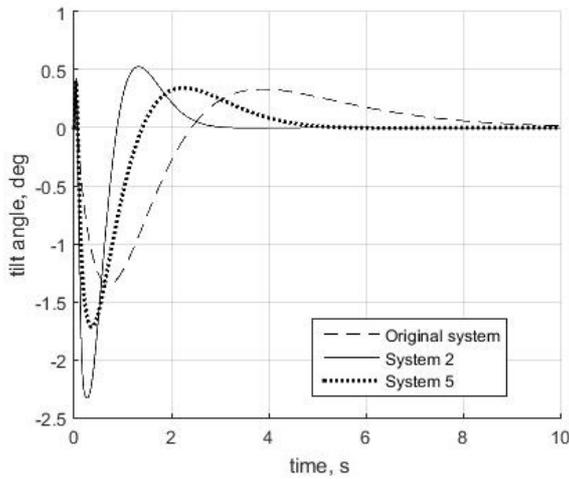


Рис. 16. Результат настройки на этапе 2: угол наклона

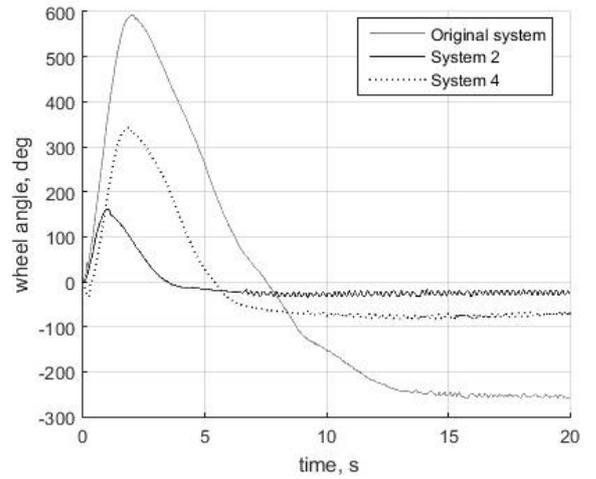


Рис. 19. Результат эксперимента: угол колеса при отработке начальных условий

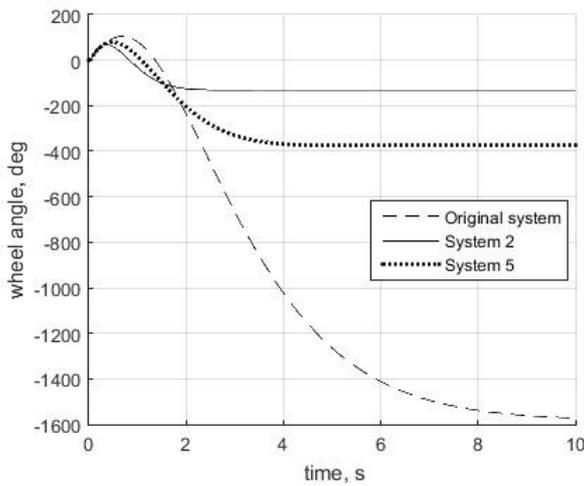


Рис. 17. Результат настройки на этапе 2: угол колеса

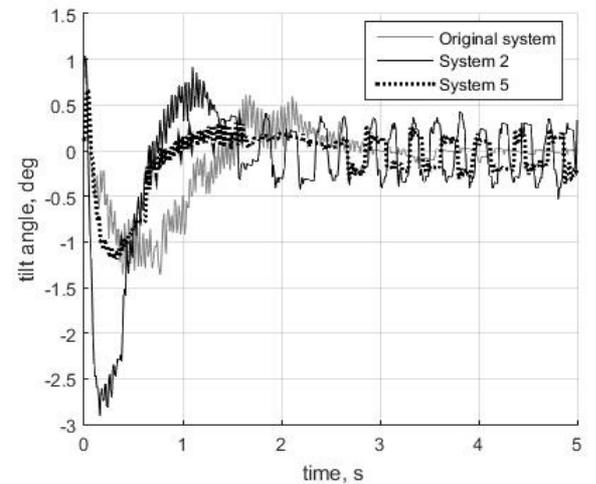


Рис. 20. Результат эксперимента: угол наклона при отработке возмущения

## VII. ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Полученные ранее значения коэффициентов регулятора были применены в системе управления реального устройства. Результаты работы полученных систем, а также исходной системы, при отработке начальных условий и отработки возмущения представлены на Рис. 18–21.

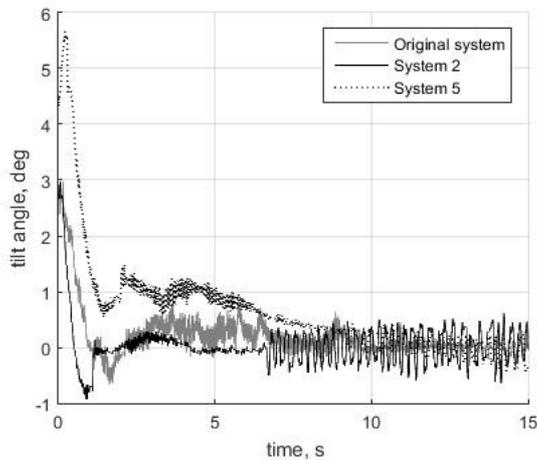


Рис. 18. Результат эксперимента: угол наклона при отработке начальных условий

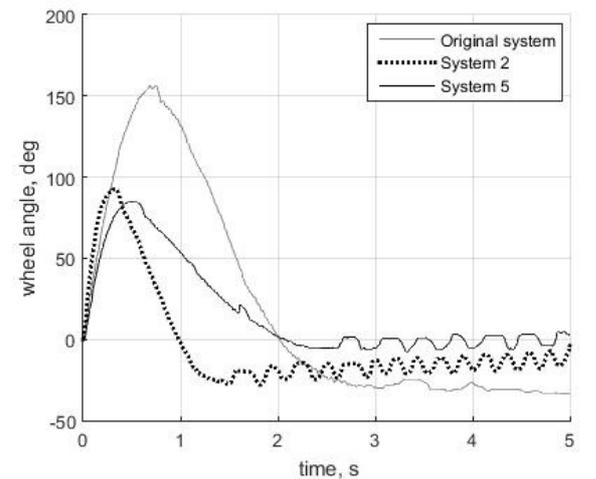


Рис. 21. Результат эксперимента: угол колеса при отработке возмущения

Из графиков видно, что процессы в реальных системах в целом соответствуют результатам моделирования. Стоит, однако, отметить, что в настроенных системах присутствуют автоколебания. Для системы с наибольшим быстродействием величина этих колебаний более существенна. При этом в по-

лученных системах существенно ниже уровень статической ошибки по величине угла поворота колеса. Таким образом, можно сделать вывод, что предложенная методика позволяет получить процессы в соответствии с конкретными требованиями к системе и для реального устройства.

### VIII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрен вопрос выбора желаемого распределения корней системы и его влияния на качество ее работы. Показано, что выбор распределения корней в виде биннома Ньютона позволяет лишь получить устойчивые процессы в системе и управлять ее общим усилением. При этом в рамках заданного усиления нет возможности задать предпочтительное требование к процессам – высокое быстродействие, малая колебательность или компромиссный вариант. Поэтому такое распределение нельзя считать приемлемым. В результате проведенного исследования предложена методика, основанная на использовании метода численной оптимизации. Показано, что данная методика позволяет настроить процессы в системе в соответствии с конкретными требованиями к системе путем изменения вида стоимостной функции, используемой при оптимизации системы. Результаты исследования подтверждены численным моделированием и экспериментально.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Toscano R. A simple robust PI/PID controller design via numerical optimization approach. *Journal of Process Control*. vol. 15, no. 1, pp. 81-88, Feb. 2005.
- [2] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24 – 26, 2010 Phuket, Thailand. P. 27–32.
- [3] Sanchis R., Romero J., Balaguer P. Tuning of PID controllers based on simplified single parameter optimization. *International Journal of Control*. vol. 83, no. 9, P. 1785–1798, Jul. 2010.
- [4] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Yadrishnikov O.D. Calculation of regulators for the problem of mechatronics by means of numerical optimization method. 12th International Conference on Actual Problems on Electronic Instrument Engineering APEIE 2014. Proceedings.
- [5] Zhmud V. A., Semibalamut V. M., Vostrikov A. S. Feedback systems with pseudo local loops. Testing and measurement: techniques and applications: proc. of the 2015 Intern. Conf. on testing and measurement techniques (TMTA 2015), Thailand, Phuket Island, 16–17 Jan. 2015. – London: CRC Press, 2015. – P. 411–416. - 200 copy. - ISBN 978-1-138-02812-1-8.
- [6] Walton C., Phelps C., Gong Q., Kaminer I. A Numerical Algorithm for Optimal Control of Systems with Parameter Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 49, no. 18, pp. 468-475, 2016.
- [7] Diaz-Rodriguez I., Han S., Keel L., Bhattacharyya S. “Advanced Tuning for Ziegler-Nichols Plants”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, P. 1805–1810, Jul. 2017.
- [8] Zhmud V., Zavorin A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015): proc.*, Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. – Art. 130 (6 p.). ISBN 978-1-4799-7102-2. - DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147060.
- [9] M. Jin, J. Lee, P. Chang, M. Kim, S. Kang “Automatic Gain Tuning for Robust PID Control Using Time-Delay Control”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, pp. 4318-4323, Jul. 2017.
- [10] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D., Semibalamut V.M. Control of the objects with a single output and with two or more input channels of influence. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. Vol.59, 2015. WIT Press. [www.witpress.com](http://www.witpress.com), ISSN 1743-355X. P. 147–156.
- [11] Quiryne R. “Numerical Simulation Methods for Embedded Optimization”. Ph.D. dissertation, Faculty of Engineering Science., KU Leuven, Leuven, Belgium, 2017. Available: [ftp://ftp.esat.kuleuven.be/pub/SISTA/ida/reports/17-18.pdf](http://ftp.esat.kuleuven.be/pub/SISTA/ida/reports/17-18.pdf).
- [12] Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A. and Trubin V. G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 14-16 march, 2018.
- [13] Fedorov D., Ivoilov A., Zhmud V., Trubin V. Development of Deflection Angle Stabilizing System for Balancing Robot. *Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems*. – 2015. №1. P. 65–82. ISSN 2371-1647.
- [14] Ivoilov A. Y., Zhmud V. A., Trubin V. G., Dimitrov L. V. Detection of unrevealed nonlinearities in the layout of the balancing robot. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc.*, Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 9 p. - ISBN 2380-6516.
- [15] Lebedev S. K., Gnezdov N. E., Kolganov A. R. Dynamic Model Selection For Vector Control Systems of AC Electric Drives. XVI mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja konferentsija “Electroprivody peremennogo toka” [XVI International Science Conference “AC Electric Drives”]. Ekaterinburg, 2015.
- [16] Ким Д.Р. Алгебраические методы синтеза систем автоматического управления. Физматгиз. М. 2014.
- [17] Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A. and Roth H. The Dynamic Accuracy Increasing for a Controlling System by Means of the Modified Algorithm of Numerical Optimization of the Regulator. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 2018.



**Андрей Юрьевич Ивойлов** - аспирант кафедры Автоматики НГТУ.

E-mail: [iau13hv@mail.ru](mailto:iau13hv@mail.ru)

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20



**Вадим Аркадьевич Жмуд** - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.  
**E-mail:** [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

630073, Новосибирск,  
 Просп. К. Маркса, д. 20



**Виталий Геннадьевич Трубин** - зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».  
**E-mail:** [trubin@ngs.ru](mailto:trubin@ngs.ru)

630073, Новосибирск,  
 Просп. К. Маркса, д. 20



**Губерт Рот** – Заведующий кафедрой Автоматизированного управления в университете Зигена, профессор, г. Зиген, Германия

E-mail: [hubert.roth@uni-siegen.de](mailto:hubert.roth@uni-siegen.de)

Adolf-Reichwein-Strasse 2, Siegen, Germany

Статья получена 14 мая 2018 г.

## Obtaining the Desired form of the Processes of the Stabilizing System of the Two-Wheeled Balancing Robot Based on the Numerical Optimization

A.Yu. Ivoylov<sup>1</sup>, V.A. Zhmud<sup>1</sup>, V.G. Trubin<sup>1</sup>, H. Roth<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia  
<sup>2</sup>Siegen University, Siegen, Germany

*Abstract* - This paper solves the problem of ensuring the desired form of the transient processes of the automatic stabilization system of the two-wheeled balancing robot. It is necessary to choose the distribution of the roots of the desired dynamics polynomial to set the form of the processes of the system. As we deal with a real device, the task of choosing the roots distribution becomes more complicated due to a presence of such nonlinearities as static friction and backlash in actuators, the limitation of the control action, and others. Usually general requirements for the transient processes of the system are used to set the roots distribution. These requirements are maximum level of an overshoot and maximum duration of a transient process. The requirements described above define the sector on the complex plane in which the roots should be placed. But in addition it is necessary to set the distribution inside this sector, and this issue remains open. It is shown in the paper that the roots distribution in accordance with the Newton binomial is not give an acceptable result. In this case there is no ability to correct the transient process form toward more speed or less overshoot value. We propose a method of obtaining the processes with the desired form based of the numerical optimization. This method is based on changing the form of cost function which is used to perform the optimization procedure.

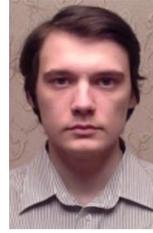
*Key words* - automatic control system, regulator, numerical optimization, adjustment of the regulator coefficients, robot, microcontroller, desired equation of dynamics

### REFERENCES

- [1] Toscano R. A simple robust PI/PID controller design via numerical optimization approach. *Journal of Process Control*. vol. 15, no. 1, pp. 81-88, Feb. 2005.
- [2] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // *Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24 – 26, 2010 Phuket, Thailand*. P. 27–32.
- [3] Sanchis R., Romero J., Balaguer P. Tuning of PID controllers based on simplified single parameter optimization. *International Journal of Control*. vol. 83, no. 9, P. 1785–1798, Jul. 2010.
- [4] Zhmud V.A., Dimitrov L.V., Yadrishnikov O.D. Calculation of regulators for the problem of mechatronics by means of numerical optimization method. *12th International Conference on Actual Problems on Electronic Instrument Engineering APEIE 2014. Proceedings*.
- [5] Zhmud V. A., Semibalamut V. M., Vostrikov A. S. Feedback systems with pseudo local loops. Testing and measurement: techniques and applications: proc. of the 2015 Intern. Conf. on testing and measurement techniques (TMTA 2015), Thailand, Phuket Island, 16–17 Jan. 2015. – London: CRC Press, 2015. – P. 411–416. - 200 copy. - ISBN 978-1-138-02812-1-8.
- [6] Walton C., Phelps C., Gong Q., Kaminer I. A Numerical Algorithm for Optimal Control of Systems with Parameter Uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 49, no. 18, pp. 468-475, 2016.
- [7] Diaz-Rodriguez I., Han S., Keel L., Bhattacharyya S. “Advanced Tuning for Ziegler-Nichols Plants”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, P. 1805–1810, Jul. 2017.
- [8] Zhmud V., Zavorin A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON-2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. – Art. 130 (6 p.). ISBN 978-1-4799-7102-2. - DOI: 10.1109/SIBCON.2015.7147060.*
- [9] M. Jin, J. Lee, P. Chang, M. Kim, S. Kang “Automatic Gain Tuning for Robust PID Control Using Time-Delay Control”. *IFAC-PapersOnLine*. vol. 50, no. 1, pp. 4318-4323, Jul. 2017.
- [10] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D., Semibalamut V.M. Control of the objects with a single output and with two or more input channels of influence. *WIT Transaction on Modelling and Simulation*. Vol.59, 2015. WIT Press. [www.witpress.com](http://www.witpress.com), ISSN 1743-355X. P. 147–156.
- [11] Quiryren R. “Numerical Simulation Methods for Embedded Optimization”. Ph.D. dissertation, Faculty of Engineering Science., KU Leuven, Leuven, Belgium, 2017. Available:

<ftp://ftp.esat.kuleuven.be/pub/SISTA/ida/reports/17-18.pdf>.

- [12] Ivoilov A. Yu, Zhmud V. A. and Trubin V. G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 14-16 march, 2018.
- [13] Fedorov D., Ivoilov A., Zhmud V., Trubin V. Development of Deflection Angle Stabilizing System for Balancing Robot. Journal of Advances in Management Sciences & Information Systems. – 2015. №1. P. 65–82. ISSN 2371-1647.
- [14] Ivoilov A. Y., Zhmud V. A., Trubin V. G., Dimitrov L. V. Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 9 p. - ISBN 2380-6516.
- [15] Lebedev S. K., Gnezdov N. E., Kolganov A. R. Dynamic Model Selection For Vector Control Systems of AC Electric Drives. XVI mezhdunarodnaja nauchno-tekhnicheskaja konferentsija "Electroprivody peremennogo toka" [XVI International Science Conference "AC Electric Drives"]. Ekaterinburg, 2015.
- [16] Kim D.P. Algebraicheskiye metody siteza sistem avtomaticheskogo upravlenija (Algebraic synthesis methods of the automatic control systems), Moscow, Russia: FIZMATLIT, 2014.
- [17] Ivoilov A. Yu., Zhmud V. A. and Roth H. The Dynamic Accuracy Increasing for a Controlling System by Means of the Modified Algorithm of Numerical Optimization of the Regulator. 2018 Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies (MWENT). Moscow, 2018.



**Andrey Yurievich Ivoilov** – PhD-student of Department of Automatics of NSTU.

**E-mail:** [iau13hv@mail.ru](mailto:iau13hv@mail.ru)

630073, Novosibirsk,  
srt. Prosp. K. Marksa, h. 20



**Vadim Arkadievich Zhmud** – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences.

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

630073, Novosibirsk,  
str. Prosp. K. Marksa, h. 20



**Vitaly Gennadievich Trubin** - head of the department. lab. Automatics Department of NSTU, Director of KB Automatics.

**E-mail:** [trubin@ngs.ru](mailto:trubin@ngs.ru)



**Hubert Roth** – Head of the Department of Automatic Control Engineering of University of Siegen, Professor, Doctor of Sci., **Germany**

**E-mail:** [hubert.roth@uni-siegen.de](mailto:hubert.roth@uni-siegen.de)

Adolf-Reichwein-Strasse 2, Siegen,  
Germany

The paper was received on 14 May, 2018.

# Автоматизация выделения формант и поиска выравненных фрагментов фонограмм при подготовке к проведению фоноскопической экспертизы

*И.А. Гураков, Е.Ю. Костюченко, Д.И. Новохрестова*

Томский университет систем управления и радиоэлектроники

*Аннотация:* в данной статье рассматриваются недостатки действующего метода формантного выравнивания, а также приводится описание новой методики выделения формант и получения выравненных фрагментов фонограмм. В традиционной методике утверждается, что для проведения фоноскопической экспертизы необходимо на эталонной фонограмме найти такой участок, на спектре которого будут явно различимы первые четыре выраженных пика, которые можно разумно интерпретировать как форманты, после этого в исследуемой фонограмме ищутся формантно-выравненные участки (участки артикуляторно-подобных событий, у которых совпадают первые две формантные частоты), для этих участков выделяются первые четыре формантные частоты и сравниваются с эталонными. Решение о совпадении или несовпадении дикторов принимается на основе количества совпавших участков, в традиционной методике утверждается, что достаточно 7-10 совпадений фрагментов для вывода совпадении дикторов. Данная методика имеет следующие слабые места: 1) форманты постоянно меняют свое положение в процессе звучания слога; 2) различные повторения одного и того же артикуляторного события не будут давать одинаковые комбинации формант, а значит говорить о полном совпадении формантных частот нельзя, нужно говорить о некотором диапазоне частот; 3) традиционная методика не рассматривает такой феномен, как «лишняя» форманта; 4) проблема выбора эталонного набора формант. В результате: 1) была разработана система для автоматизированного выделения формант с учетом выявленных недостатков традиционной методики и построения распределения; 2) построены распределения формант нескольких дикторов; 3) разработана система автоматизированной оценки сходства дикторов двух аудиозаписей на основе алгоритма построения распределений формант. Особенность разработанного метода заключается в том, что вместо рассмотрения одного эталонного набора из первых четырех формант, рассматривается множество эталонных комбинаций формант, а вывод о схожести подобных артикуляторных событий делается не в результате сравнения эталонного набора с выравненным участком, а посредством количественной оценки выравненных и совпавших участков для всех эталонных комбинаций формант. Также, «лишние» форманты не принимаются за неопределенность, а формируют еще один полноценный набор формант для участка, на котором они появляются.

*Ключевые слова:* форманта, формантное выравнивание, фоноскопическая экспертиза.

## ВВЕДЕНИЕ

В криминалистике часто возникает потребность установления личности человека по имеющейся звукозаписи. С этой целью было разработано несколько методик идентификации лиц на основании физических параметров звучащей речи с применением ЭВМ. Однако большинство этих методик требует наличия специализированного оборудования, позволяющего непосредственно обрабатывать звуковые сигналы [1]. При этом, исследование звукозаписи перцептивными методами все равно является обязательным.

Исследования методов верификации дикторов продолжаются уже некоторое время [2] и разные исследователи предлагают различные наборы признаков голосового тракта, которые следует использовать при верификации. К примеру, В [3] в качестве признаков использовались частота основного тона, три формантных частоты на переходных и стационарных участках гласных, параметры огибающей спектра фрикативных, а также общая длительность слова и относительные длительности сегментов речи. Явным

недостатком этого подхода является то, что просодические характеристики обладают малой различающей способностью и легко поддаются имитации.

В [4] наиболее важным фактором индивидуальности голоса считается частота основного тона, за ней – формантные частоты, размер флюктуаций частоты основного тона и наклон спектра. Однако, как и в [3], не смотря на устойчивость этих признаков, они легко поддаются имитации и имеют малой различительной способностью.

В [5] наиболее важным фактором считаются формантные частоты, а в частности четвертая форманта, которая практически не зависит от типа фонемы и характеризует тракт [6].

В данной работе проводится исследование метода формантного выравнивания. Методика имеет несколько моментов, требующих рассмотрения:

- согласно стандартной методике, специалист должен проанализировать аудиозапись, найти подобный артикуляторные события, найти в них закономерность и выбрать промежуток 10-30мс, на основе которого будут выделяться форманты.

Однако нет никакой гарантии, что эти, взятые «на глаз» промежутки действительно будут в достаточной степени совпадать, а, даже если и будут, то даже у одного диктора в одинаковых слогах формантные траектории могут сильно различаться раз от раза;

- интервал, в пределах которого можно говорить о совпадении или несовпадении формант. Полное совпадение четырех формант – довольно редкое совпадение даже для одного диктора, с другой стороны, при желании можно найти совпадения и у разных дикторов;

- традиционная методика утверждает, что достаточно найти 7-10 выравненных участков, чтобы утверждать о совпадении дикторов, однако никак не осмещается тот факт, что выравненных участков с несовпадающим полным набором формант может быть гораздо больше.

## I. ТИПОВАЯ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ДЕЙСТВИЙ ЭКСПЕРТА

При проведении фоноскопической экспертизы на основе традиционного метода формантного выравнивания, экспертом просматривается эталонная спектрограмма и проводится поиск участков речевого спектра с ярко выраженной формантной картиной при наличии четвертой и более высоких формант. Обычно минимальной единицей рассмотрения является слог. На звукозаписи должен звучать голос только одного диктора [7].

При просмотре спектрограммы звукозаписи эксперт должен уяснить типичное поведение формант данного диктора для однотипных артикуляторных событий и на основе этого выбрать опорный фрагмент фонограммы, на котором прослеживается траектория четырех или более формант и выбранные спектральные максимумы однозначно интерпретируются как форманты, т.е. соответствуют теоретическому представлению, а все исчезновения формант или появление «лишних» формант можно разумно интерпретировать.

По выбранному фрагменту строится спектр и выбираются выраженные максимумы мощности в диапазонах, соответствующих стандартным диапазонам расположения формант.

После выделения формант опорного фрагмента, диктор должен найти на исследуемой фонограмме выравненные участки артикуляторных событий, подобных артикуляторному событию опорного фрагмента. Под выравненным участком понимается участок исследуемой звукозаписи, на котором первые две форманты совпадают с соответствующими формантами опорного фрагмента.

Для каждого выравненного фрагмента проверяются на совпадение остальные форманты. Решение о схожести дикторов по данному артикуляторному событию принимается на основе количества совпавших выравненных участков.

## II. ПРОБЛЕМЫ ВЫДЕЛЕНИЯ ФОРМАНТ

Главной проблемой форманты, является ее нестабильность. Эта нестабильность имеет разные выражения: 1) в рамках одного слога форманты постоянно меняют свое значение. Соседние согласные оказывают огромное влияние на частоту форманты гласной, в результате, собственные форманты гласной в чистом виде, в большинстве случаев, наблюдать невозможно (Рис. 1); 2) при произнесении одного и того же слога, одним и тем же диктором, в одинаковых условиях, в одинаковых психическом и физическом состояниях даст различные траектории формант. Эти траектории не будут различаться сильно, но идеального совпадения не будет никогда. Это вызвано тем, что малейшие изменения в интонации, как и эмоциональное состояние, физическое состояние, посторонние предметы во рту и т.д. могут сильно влиять на траектории формант.

Отдельно стоит рассмотреть «лишние» форманты. В традиционной методике такие случаи, как правило, не рассматриваются, однако им все же стоит уделить внимание, поскольку, если эти «лишние» форманты появляются стабильно в схожих артикуляторных событиях конкретного диктора, то их тоже можно использовать в качестве параметра идентификации (Рис. 2).

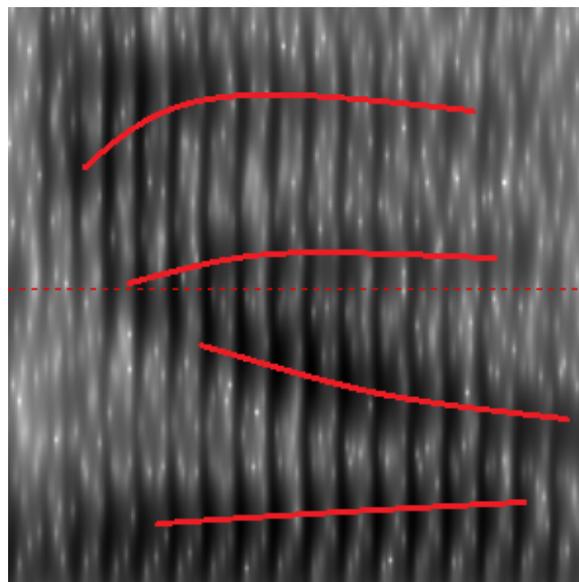


Рис 1. Пример движения формант на примере спектрограммы слога «нёк»

Последняя выделенная проблема – это проблема выбора диапазона, из которого будут выделяться эталонные форманты. Согласно методике, диапазон выбирается на основе типичного поведения формант для подобных артикуляторных событий, однако, в обычной речи, такие события не всегда встречаются часто, особенно для коротких аудиозаписей. В ударных слогах гласная может звучать до 120мс, а диапазон, из которого выделяются форманты,

обычно берут не более 30мс. Следовательно, нужно определить правила выбора диапазона в случае, когда недостаточно подобных артикуляторных событий для выявления типичных закономерностей движения формант, либо перейти от рассмотрения одного выравненного участка артикуляторного события исследуемой аудиозаписи к множеству участков одного артикуляторного события.



Рис. 2. Пример «лишней» форманты

### III. ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ВЫДЕЛЕНИЯ ФОРМАНТ

Данный алгоритм предназначен для работы со звукозаписями слогов. На записи должен присутствовать голос только одного диктора, диктор должен произносить только один слог.

На первом этапе алгоритма из записи выделяется диапазон, в котором предположительно хорошо будут определяться четыре форманты.

Затем, в рамках данного диапазона, с некоторым шагом берутся промежутки по 30мс, в рамках которых будут выделяться форманты.

Для каждого 30мс интервала строится спектр сигнала и выделяются выраженные пики в заданных промежутках. В зависимости от выраженности пиков и их количества строятся комбинации формант для каждого интервала.

В результате для каждой записи получается распределение формантных частот (все

комбинации частот уникальны) вида, как показано на Рис. 3.

	Step	F1	F2	F3	F4
1	1	733.3333	1.5667e+03	2100	3.1667e+03
2	1	733.3333	1.5667e+03	2.6333e+03	3.1667e+03
3	2	733.3333	1.5667e+03	2600	3.1667e+03
4	2	733.3333	1.0333e+03	2600	3.1667e+03
5	2	733.3333	1.0333e+03	2100	3.1667e+03
6	3	766.6667	1.5667e+03	2.3333e+03	3.1667e+03
7	4	800	1.5667e+03	2.3333e+03	3.1333e+03
8	10	433.3333	1.0667e+03	2200	3300
9	10	433.3333	1.5667e+03	2200	3300
10	14	433.3333	1.3333e+03	2.1667e+03	3.3333e+03
11	15	466.6667	1.3667e+03	2200	3.4333e+03
12	16	466.6667	1400	2200	3.4333e+03
13	17	466.6667	1400	2200	3400
14	18	500	1.4333e+03	2200	3.4667e+03
15	19	500	1.4333e+03	2.1667e+03	3.4667e+03
16	20	466.6667	1.4333e+03	2.1667e+03	3.4667e+03
17	21	466.6667	1.4333e+03	2.6667e+03	3.4667e+03
18	22	466.6667	1.4667e+03	2.6333e+03	3.4667e+03
19	22	633.3333	1.4667e+03	2.6333e+03	3.4667e+03
20	22	466.6667	1.4667e+03	2.1667e+03	3.4667e+03
21	22	633.3333	1.4667e+03	2.1667e+03	3.4667e+03
22	23	466.6667	1.4667e+03	2.6333e+03	3400
23	23	633.3333	1.4667e+03	2.6333e+03	3400
24	23	466.6667	1.4667e+03	2.1667e+03	3400

Рис. 3. Пример распределения формант записи

### IV. ПОИСК И СРАВНЕНИЕ ВЫРАВНЕННЫХ ФРАГМЕНТОВ

На основе алгоритма выделения формант была разработана программа для поиска и сравнения выравненных участков. Данная программа получает на вход две звукозаписи слогов, для каждого запускает алгоритм выделения формант и получает два распределения.

Каждая комбинация формант из первого распределения сравнивается с каждой комбинацией формант из второго распределения. Программа позволяет выбирать разброс частот для каждой форманты, поскольку идеальное совпадение комбинаций формант в рамках одного диктора – большая редкость. В результате получается количество выравненных и совпавших участков для каждой пары комбинаций формант двух распределений. Внешний вид программы приведен на Рис. 4.

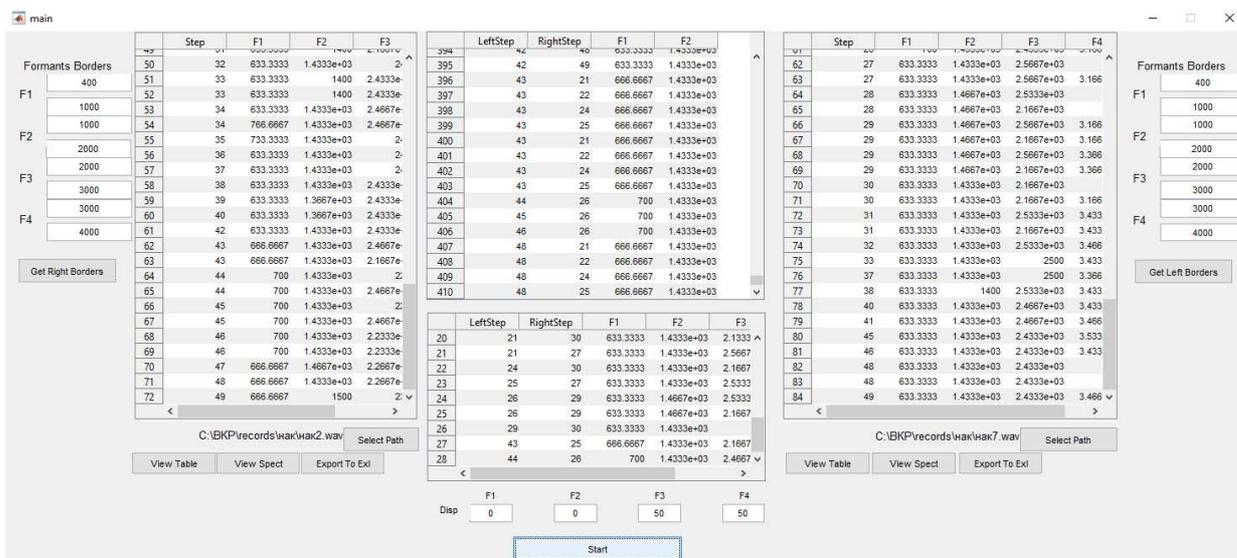


Рис. 4. Внешний вид разработанной программы

## V. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ ПРОГРАММЫ

С целью тестирования программы были получены распределения для 6 гласных в составе однотипного слога для 2-х дикторов. Каждый слог записывался 20 раз. Записи были проанализированы в рамках каждого диктора и между дикторами. Результаты для слога «нук» представлены в *Таблице 1*.

Таблица 1  
Результаты работы программы на примере слога «нук»

	1 и 1 Диктор	1 и 2 Дикторы	2 и 2 Диктор
Среднее количество выравненных участков	31,76053	23,9325	44,06579
Среднее количество совпавших комбинаций формант	3,4	0,51	6,915789
Максимальное количество выравненных участков	122	119	112
Максимальное количество совпавших участков	13	6	26
Количество пар записей без выравненных участков	6	15	0
Количество пар записей без совпавших комбинаций	174	366	54

Разумеется, такой маленькой базы недостаточно для получения полноценных результатов, однако даже так можно сделать несколько полезных наблюдений.

Как видно из результатов сравнения, среднее количество выравненных участков и среднее количество совпавших комбинаций формант при сравнении записей в рамках одного диктора, как правило, многократно превышают эти параметры при сравнении разных дикторов. Про количество пар записей без выравненных участков и количество пар записей без совпавших комбинаций формант так же можно заметить, что при сравнении записей в рамках одного диктора, эти значения заметней меньше, чем при сравнении разных дикторов. Как было сказано ранее, фундаментальных выводов на этом сделать нельзя, однако тот факт, что значения не выбиваются за пределы ожиданий после первого теста, уже говорит о теоретически верном направлении исследования.

Отдельное внимание стоит уделить парам записей, между которыми не было найдено совпадений. При получении распределений формант всегда брались выраженные пики, которые можно разумно интерпретировать как форманты, а если однозначный вывод нельзя было сделать, то создавалась избыточность, посредством преумножения комбинаций формант за счет «лишних» формант. Из этого можно сделать вывод, что та комбинация, которую теоретически мог выбрать эксперт в своем исследовании с большой вероятностью попадает в наше распределение. Однако, согласно результатам, есть пары записей без совпавших комбинаций формант. Это говорит о том, что, независимо от того, какой интервал выберет эксперт на эталонной фонограмме, он не найдет подходящих выравненных фрагментов на исследуемой фонограмме, несмотря на то, что обе записи сделаны одним диктором.

Так же стоит обратить внимание на соотношение выравненных участков к совпавшим. Количество выравненных участков многократно превышает количество совпавших, несмотря на то, что, согласно традиционной методике, старшие форманты должны полностью определяться младшими. Исходя из полученных данных, это совершенно не так, а значит, при использовании традиционной методике, у эксперта есть большой шанс ошибиться с выбором выравненного участка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанный алгоритм выделения формант для записей позволяет получить более полный набор параметров верификации диктора, а методика сравнения записей дикторов по распределениям формант, а не по выравненному участку дает больше оснований для принятия решения о схожести дикторов, а также показывает ненадежность традиционной методике в силу высокой вероятности ошибки эксперта при выборе опорных и выравненных участков.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Экспертиза видео- и звукозаписей URL: <http://www.sudexpert.ru/possib/video.php>
- [2] Мещеряков Р.В. Система аутентификации человека по речи cartha. Научная сессия ТУСУР. 2010. с. 127–129.
- [3] Sorokin V.N., Tsyplikhin A.I. Speaker verification using the spectral and time parameters of voice signal. Journal of Communications Technology and Electronics. 2010. Vol. 10, No. 2. p. 87–104.
- [4] Matsumoto H., Hiki S., Sone T., Nimura T. Multidimensional representation of personal quality of vowels and its acoustical correlates. IEEE Trans. 1973. Vol. 21, No. 5. p. 428–436.
- [5] Lavner Y., Gath I., Rosenhouse J. The effects of acoustic modifications on the identification of familiar voices speaking isolated vowels. Speech Communication. 2000. Vol. 30, No 1. p. 9–26.
- [6] Takemoto H., Adachi S., Kitamura T., Mokhtari P., Honda K. Acoustic roles of the laryngeal cavity in

vocal tract resonance. The Journal of the Acoustical Society of America. 2006. Vol. 120, No. 4. p. 28–38.

- [7] Vainio L., Mustonen T., Vainio M. The Influence of Number Magnitude on Vocal Responses. Journal of Motor Behavior. 2018. p. 1–12.



**Иван Алексеевич Гураков** - студент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: [gia@keva.tusur.ru](mailto:gia@keva.tusur.ru)

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, д. 40



**Евгений Юрьевич Костюченко** - к.т.н., доцент каф. комплексной информационной безопасности электронно-вычислительных систем Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: [key@keva.tusur.ru](mailto:key@keva.tusur.ru)

Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, д. 40

**Дарья Игоревна Новохрестова** - техник лаб. Медико-биологических исследований Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники  
E-mail: [ndi@fb.tusur.ru](mailto:ndi@fb.tusur.ru)  
Адрес: 634050, Россия, г. Томск, пр-т Ленина, д. 40

Статья поступила 14 мая 2018 г.

## Automation of Selection of Formants and Search for Aligned Fragments of Phonograms in Preparation for Phonoscopic Examination

*I.A. Gurakov, E.Yu. Kostyuchenko, D.I. Novohrestova*

Tomsk University of Control Systems and Radioelectronics

*Abstract:* in this article the shortcomings of the current method of formant equalization are considered, and a description of a new technique for extracting formants and obtaining aligned fragments of phonograms is described. In the traditional method, it is stated that for phonoscopic examination it is necessary to find on a reference phonogram such a section on the spectrum of which the first four expressed peaks will be clearly distinguishable which can reasonably be interpreted as formants, after that, formantly aligned areas (articulatory- similar events in which the first two formant frequencies coincide), the first four formant frequencies are allocated for these regions and compared with the reference ones. The decision on the coincidence or inconsistency of the speakers is made on the basis of the number of coincident sites, in the traditional method it is stated that 7-10 coincidences of the fragments are sufficient to ensure the coincidence of the announcers. This technique has the following weak points: 1) formants constantly change their position in the process of sounding the syllable; 2) different repetitions of the same articulatory event will not give the same combination of formants, which means that it is impossible to speak of a complete coincidence of the formant frequencies, we need to talk about a certain frequency range; 3) the traditional method does not consider such a phenomenon as the "extra" formant; 4) the problem of choosing a standard set of formants. As a result: 1) a

system was developed for the automated allocation of formants, taking into account the identified shortcomings of the traditional method and the construction of the distribution; 2) distributions of formants of several speakers are constructed; 3) the system of the automated estimation of similarity of speakers of two audiotapes is developed on the basis of algorithm of construction of distributions formant. The peculiarity of the developed method is that instead of considering one reference set of the first four formants, a lot of reference formant combinations are considered, and the conclusion about the similarity of similar articulatory events is made not by comparison of the reference set with the aligned area, but by a quantitative evaluation of aligned and coincident sites for all reference formant combinations. Also, the "extra" formants are not accepted for uncertainty, but form another complete set of formants for the site on which they appear.

*Key words:* formant, formant alignment, phonoscopic examination.

## REFERENCES

- [1] Ekspertiza video- i zvukozapisey URL: <http://www.sudexpert.ru/possib/video.php>
- [2] Meshcheryakov R.V. Sistema autentifikatsii cheloveka po rechi captha. Nauchnaya sessiya TUSUR. 2010. s. 127–129.
- [3] Sorokin V.N., Tsyplikhin A.I. Speaker verification using the spectral and time parameters of voice signal. Journal of Communications Technology and Electronics. 2010. Vol. 10, No. 2. p. 87–104.
- [4] Matsumoto H., Hiki S., Sone T., Nimura T. Multidimensional representation of personal quality of vowels and its acoustical correlates. IEEE Trans. 1973. Vol. 21, No. 5. p. 428–436.
- [5] Lavner Y., Gath I., Rosenhouse J. The effects of acoustic modifications on the identification of familiar voices speaking isolated vowels. Speech Communication. 2000. Vol. 30, No 1. p. 9–26.
- [6] Takemoto H., Adachi S., Kitamura T., Mokhtari P., Honda K. Acoustic roles of the laryngeal cavity in vocal tract resonance. The Journal of the Acoustical Society of America. 2006. Vol. 120, No. 4. p. 28–38.
- [7] Vainio L., Mustonen T., Vainio M. The Influence of Number Magnitude on Vocal Responses. Journal of Motor Behavior. 2018. p. 1–12.



**Ivan A. Gurakov**- student, Department of Complex Information Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
E-mail: [gja@keva.tusur.ru](mailto:gja@keva.tusur.ru)  
Address: 40, prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russia



**Evgeny Y. Kostyuchenko**- Ph.D., associate professor, Department of Complex Information Security, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
E-mail: [key@keva.tusur.ru](mailto:key@keva.tusur.ru)  
Address: 40, prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russia

**Daria I. Novokhrestova**- Technic, Laboratory of Medic-Biological Researches, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics  
E-mail: [ndi@fb.tusur.ru](mailto:ndi@fb.tusur.ru)  
Address: 40, prospect Lenina, 634050, Tomsk, Russia

The article was received on May 14, 2018.

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

**Содержание раздела:**

- ◇ Гриф М.Г., Кочетов С.А., Ганелина Н.Д. Методы проектирования и моделирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. №2 (24). С. 52–58.

# Методы проектирования и моделирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории

*М.Г. Гриф, С. А. Кочетов, Н. Д. Ганелина*

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*Аннотация* – В статье рассмотрены модели, методы и технологии автоматизации проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории и обобщенного структурного метода проф. А.И. Губинского. В качестве основных стратегий проектирования человеко-машинных систем описаны восходящая, нисходящая и смешанная. Последовательность выполняемых операций формируется из типовых функциональных единиц, которые можно объединять в типовые функциональные структуры. Функциональная сеть, описывающая процесс функционирования человеко-машинной системы, представляет собой совокупность (суперпозицию) типовых функциональных структур. Генерация множества альтернативных процессов человеко-машинной системы использует понятие альтернативного графа и алгоритма его обхода. Непосредственно в основе способа оценки вероятностных показателей эффективности, качества и надежности процесса функционирования ЧМС лежит вероятностный граф, а также правила его редукции (укрупнения) со следующими характеристиками:  $V$  – вероятность правильного (безошибочного) выполнения, среднего времени  $T$  и средних затрат (дохода)  $V$  от выполнения. Приведен способ представления процессов функционирования человеко-машинных систем в виде бинарных отношений элементов, входящих в функциональную сеть. Представлена общая схема поиска оптимального решения, в котором учитываются все альтернативные участки функционирования, и оптимизированный алгоритм использования повторяющегося набора параметрических альтернатив. Для поиска оптимального решения используется модифицированный алгоритм направленного перебора, в рамках которого осуществляется пошаговое конструирование частичных решений. При решении оптимизационной задачи учитываются показатели эффективности, качества и надежности как системы в целом, так и отдельных участков функциональной сети. Разработанная гибридная экспертная система имеет расширенный функционал, позволяющий строить все изоморфные представления альтернативного графа, генерировать в ручном и автоматическом режиме конкретный алгоритм направленного перебора.

*Ключевые слова* – Функционально-структурная теория, человеко-машинная система, множество альтернатив, автоматизация проектирования, стратегии проектирования.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях информационные технологии играют и будут играть все большую роль во всех областях человеческой деятельности. Особое значение приобретают информационные системы, позволяющие описывать и оценивать процессы функционирования (ПФ) сложных человеко-машинных систем (ЧМС). Специфика ЧМС требует решать задачи оптимизации по совокупности разных по природе критериев. Необходимо проанализировать большой объем информации, учесть экспертные оценки групп специалистов, исследовать множество возможных вариантов выполнения отдельных участков изучаемого процесса и спрогнозировать их последствия, получить обоснование для выбора. Для повышения адекватности используемых моделей приходится учитывать все большее число факторов, что неизбежно приводит к трудностям выбора оптимальных вариантов выполнения ПФ ЧМС. Все это способствует развитию информационных систем, обеспечивающих возможность качественного проектирования и исследования ЧМС с достаточно большим числом альтернатив функционирования различных подсистем всего процесса.

Одной из часто используемых моделей ПФ ЧМС являются функционально-структурная теория (ФСТ) и обобщенный структурный метод (ОСМ) проф. А.И. Губинского [1]. Так, в работах [2–4] получили развитие модели, методы и технологии последовательной оптимизации процессов функционирования ЧМС по показателям эффективности, качества и надежности (ЭКН) на основе ФСТ. Непосредственно в основе способа оценки вероятностных показателей эффективности, качества и надежности процесса функционирования ЧМС лежит вероятностный граф, а также правила его редукции (укрупнения) со следующими характеристиками:  $V$  – вероятность правильного (безошибочного) выполнения, среднего времени  $T$  и средних затрат (дохода)  $V$  от выполнения.

На сегодняшний день существует хорошо изученная нисходящая стратегия проектирования функциональных сетей (ФС) [4]. В настоящей статье рассматриваются недостатки такой стратегии, а также представляется восходящая и смешанная стратегия проектирования ПФ ЧМС.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Под процессом функционирования ЧМС понимается логико-временная последовательность действий и операций эргатических и неэргатических элементов системы, устойчивая к возмущениям и ведущая к достижению поставленной цели (или целей) функционирования [2–3]. ПФ ЧМС протекает во взаимосвязанных пространствах: элементов ЧМС  $E$ , выполняемых функций  $F$ , состояний ЧМС  $S$ , происходящих событий  $W$  и показателей ЧМС  $Q$ .

Проектирование ПФ сложных систем с использованием ФСТ и ОСМ предполагает, что каждый отдельный процесс рассматривается как самостоятельный участок ФС, и представляется состоящим из ряда формализованных единиц – типовых функциональных единиц (ТФЕ). Часто встречающиеся комбинации ТФЕ, для которых заранее рассчитаны математические модели, представляют собой типовые функциональные структуры (ТФС).

Задача оптимизации (обобщенная задача динамического программирования) ставится следующим образом

$$K_{EQR}(A) \rightarrow \text{extr}, \quad (1)$$

$$A \in M_d \subseteq M_a$$

где  $K_{EQR}(A)$  – критерий оптимальности для сочетаний критериев ЭКН;  $M_d$  – множество

допустимых альтернатив, альтернативные варианты процесса –  $M_a$  [4].

Отдельный процесс функционирования ЧМС (функциональная сеть) представляется в виде суперпозиции ТФС (BFS):

$$O_z = BFS_i(O_{i_1}, O_{i_2}, \dots, O_{i_k}), \quad (2)$$

где  $BFS_i \in M_{BFS}$ ,  $O_{i_j}$  – простая или составная операция. Две операции с совпадающей функцией  $F$  –  $O(F, E_1, Q_1)$  и  $O(F, E_2, Q_2)$  являются альтернативными («параметрическими») способами выполнения операции  $O$ , так же как и составные операции  $O = BFS_i(O_{i_1}, O_{i_2}, \dots)$  и  $O = BFS_s(O_{s_1}, O_{s_2}, \dots)$ ,  $i \neq s$  – «структурными». Рассмотрим различные стратегии проектирования процесса функционирования человеко-машинных систем.

## III. МЕТОДЫ

Одной из возможных стратегии проектирования ПФ ЧМС является, стратегия «сверху в низ», когда на самом верхнем уровне иерархии ФС рассматривается как составная операция, представляющая суперпозицию множества альтернативных способов ее выполнения. Таким образом, множество альтернативных процессов ЧМС, пользователь описывает в виде альтернативного графа (АГ, Рис. 1).

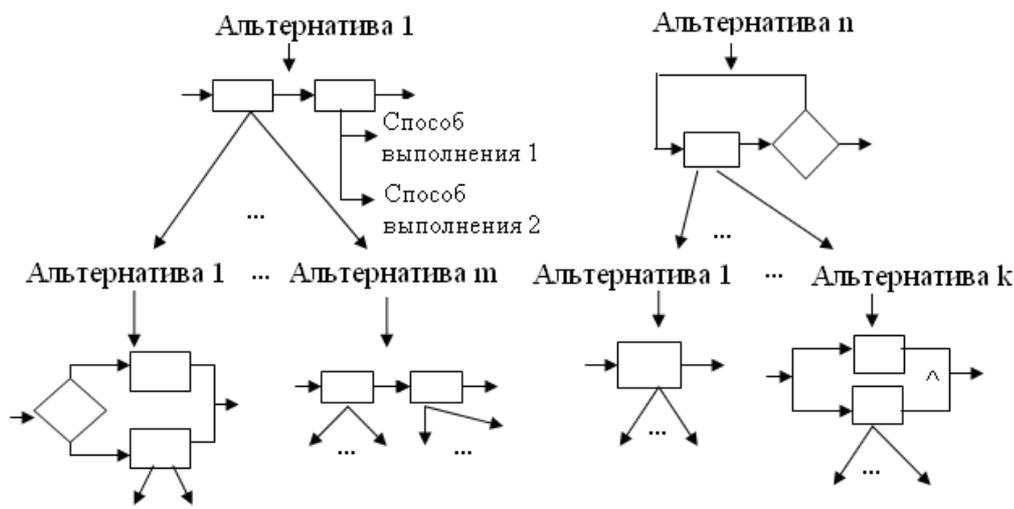


Рис. 1. Альтернативный граф для ПФ ЧМС

## IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Описанная выше стратегия реализована в гибридной экспертной системе (ГЭС) ИНТЕЛЛЕКТ-2 [4], функционирующей на компьютерах под управлением операционной среды семейства Windows, языке программирования C++Builder и Visual Prolog.

Существенным недостатком ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-2 является невозможность в

явном виде представить ПФ ЧМС как последовательность выполняемых операций. Также нет возможности рассмотреть участок ФС и оценить показатели его функционирования.

ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3 [5, 6] является дальнейшим развитием предыдущей ГЭС. Существенным отличием новой системы является возможность представлять ПФ в виде

последовательности выполняемых операций без предварительного представления ее в виде суперпозиции ТФС (Рис. 2).

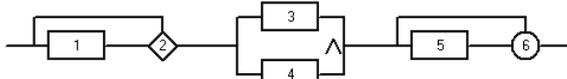


Рис. 2. Представление ПФ ЧМС в виде последовательности операций

Для расчета показателей ЭКН, а также для поиска оптимального алгоритма функционирования исследуемого процесса, ФС необходимо представить в виде суперпозиции входящих в нее ТФС. ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3, в процессе поиска оптимального решения, производит автоматическое преобразование ФС в эквивалентное представление как суперпозицию ТФС (Рис. 3).

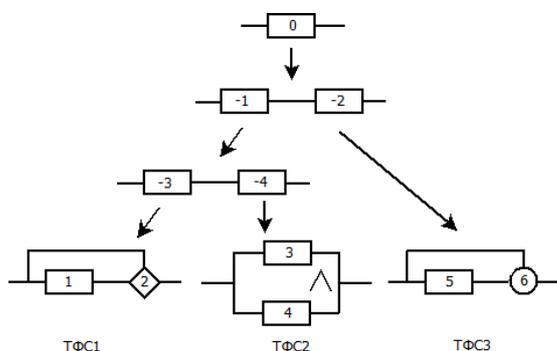


Рис. 3. Представление ПФ ЧМС в виде суперпозиции и АГ

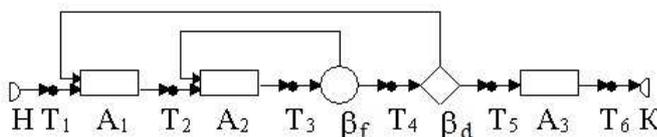


Рис. 4. Пример ФС

При формировании суперпозиции из ФС для эквивалентных Представление ПФ ЧМС в виде множества бинарных отношений элементов сети не гарантировало представление последней в виде суперпозиции ТФС. В работе [7] предложен алгоритм нахождения множества точек транзитов, участок сети между которыми, сводится к суперпозиции ТФС. В общем виде, алгоритм можно представить из следующих шагов:

Шаг 1. Проводится анализ каждого транзита «И», входящего в ФС, на предмет построения множества, изоморфного некоторой ТФС, началом которой является этот транзит «И».

Шаг 2. Если от транзита «И», взятого на шаге 1, найдено множество, изоморфное ТФС, то формируем множество  $W$  групп транзитов «И», между которыми возможно задать структурные альтернативы. Множество  $W$  формируется на основании транзитов, входящих в ТФС, заменяемую в ФС на

При формировании суперпозиции из ФС для эквивалентных (укрупненных) рабочих операций присваиваются системные (отрицательные) номера.

Первоначально в ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3 отсутствовала возможность формального описания ФС. В последних версиях системы описание ПФ можно задать в виде множества бинарных отношений  $\{(O_1, O_2), \dots, (O_{n-1}, O_n)\}$  элементов ФС, обладающих свойством:  $O_n$  следует за  $O_{n-1}$ . В номенклатуру операций для удобства добавлен композиционер – транзит «И»  $T$ , обозначающий начало и конец каждой ТФЕ. Два транзита, первый из которых, обозначает окончание ТФЕ, второй – начало следующей ТФЕ, заменяется на один транзит. Начало и окончание ФС обозначается композиционерами  $H$  и  $K$ . Формула (3) показывает пример описания ФС (Рис.4) в виде множества бинарных отношений.

$$R_{BS} = \{(H, T_1), (T_1, A_1), (A_1, T_2), (T_2, A_2), (A_2, T_3), (T_3, \beta_f), (\beta_f, T_4), (T_4, \beta_d), (\beta_d, T_5), (T_5, A_3), (A_3, T_6), (T_6, K)\} \quad (3)$$

эквивалентную рабочую операцию. Если от транзита изоморфное множество не найдено, то повторяем шаг 1 для следующего транзита «И».

Шаг 3. Повторяем шаги 1-2, пока ФС не будет преобразована в сеть, состоящую из одной эквивалентно РО. Если, рассмотрев все транзиты «И» на шаге 1, не удалось найти множество, изоморфное ТФС, то делаем вывод, что данная ФС не описывает ПФ ЧМС в рамках ФСТ.

Если взять начальный и конечный транзит ФС, тот этот алгоритм можно использовать для проверки возможности представления всей ФС в виде суперпозиции. Алгоритм был реализован в ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3.

Для поиска оптимального решения в ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3 используется алгоритм направленного перебора (АНП), в рамках общей схемы метода последовательного анализа вариантов с пошаговым конструированием частичных решений [4]. Конкретный алгоритм пошагового конструирования определяется

правилом выбора частичных решений (подсетей)  $\vartheta$ , подлежащих развитию на каждом шаге, и набор тестов  $\xi$ , осуществляющих отсе- тех из них, которые не могут быть достроены до оптимальных. В качестве набора тестов  $\xi$  используются проверка необходимых условий оптимальности (НУО) и допустимости (НУД) частичных решений. Общая схема АНП ФС по методу последовательного анализа вариантов имеет следующий вид:

$$АНП = \hat{\xi}_1(y_1), \vartheta_1(x_1), \hat{\xi}_2(y_2), \vartheta_2(x_2), \dots, \quad (4)$$

$$\xi_r(y_r), \vartheta_r(x_r), \hat{\xi}_{r+1}(O_z),$$

где  $y_j = O_k$  – выбираемая операция  $O_k$ .

### V. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Учитывая, что всего возможных вариантов построения суперпозиции ТФС из последовательного представления ФС, может быть очень велико, вероятно существование подмножества вариантов наилучшего с точки зрения временных затрат на поиск оптимального алгоритма функционирования ЧМС. Такие случаи возможны, когда на начальном этапе работы АНП, после применения тестов  $\xi$ , отсекается большая часть неоптимальных и недопустимых частичных решений. Особенность проектирования ФС в ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3, в случае задания альтернативных участков функционирования (Рис. 5), может приводить к появлению общих участков (Рис. 6).

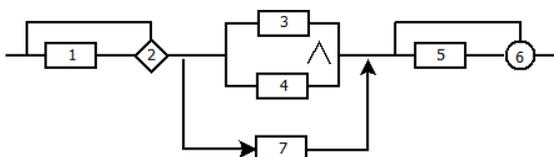


Рис. 5. ФС с альтернативным участком

Общая схема поиска оптимального решения предполагает построение АГ, в котором учитываются все альтернативные участки

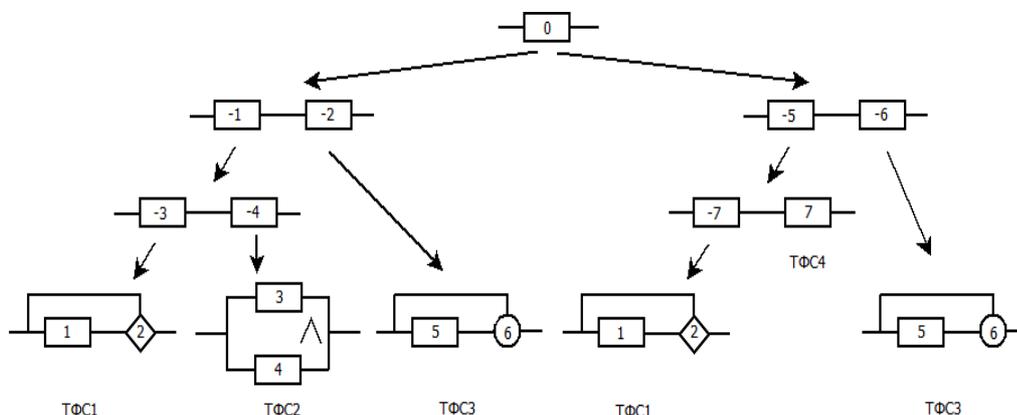


Рис. 7. АГ для ФС с альтернативным участком

функционирования. В случае сложной ФС со множеством структурных альтернатив АГ, представляющий такие ФС, может содержать многочисленные узлы с совпадающими способами выполнения операций, т. е. одинаковый набор параметрических альтернатив. АНП, использующий такой АГ для поиска оптимального алгоритма функционирования, неизбежно будет производить дублирующий расчет для подобных узлов. На “больших” ФС это приведет к потере производительности.

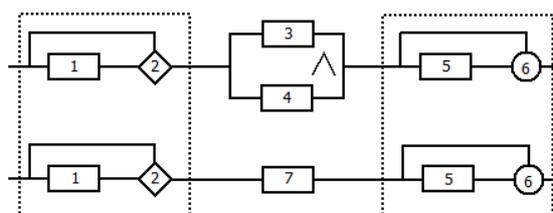


Рис. 6. Общие участки ФС

Рис. 7 представлен АГ для ФС, представленной на Рис. 5. ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3 перед построением АГ производит предварительный анализ альтернативных участков ФС на предмет совпадающих частей и последующие формирование АГ осуществляет с учетом этих общих частей (Рис. 8). Наличие совпадающих узлов в АГ повлекло за собой изменение в АНП. В случае расчетов показателей ЭКН в узле, который промаркирован как совпадающий, частичное решение, найденное в этом узле, сохраняется. Если АНП на очередном шаге требуется произвести расчеты узла, который был уже рассчитан ранее, то это решение просто извлекается из сохраненных. Таким образом, АНП в ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3 претерпел изменения, теперь частичные решения удаляются не сразу после расчета, а только после того, как будут использованы во всех ссылающихся на него узлах АГ.

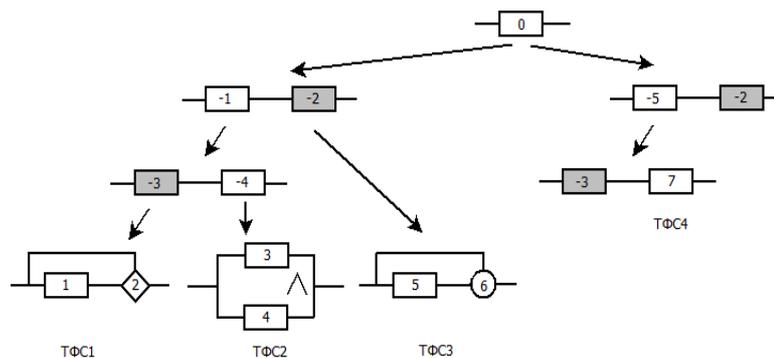


Рис. 6. АГ для ФС с выделением общих частей

В ГЭС ИНТЕЛЛЕКТ-3 имеется возможность управлять последовательностью обхода в АНП, как в ручном, так и в автоматическом режиме. В автоматическом режиме производится приблизительная оценка трудоемкости [4, 8], которая потребуется в случае выбора этой последовательности в АНП. Учитывая, что количество вариантов обхода в АНП растет в геометрической прогрессии от количества ТФС на участке, сформировать и дать приблизительную оценку трудоемкости не представляется возможным. В таких случаях формируется случайная выборка (по равномерному закону распределенная) вариантов

обхода, количество которых, указывается проектировщиком ФС.

Для примера, показанного на Рис. 5, варианты обхода по умолчанию показаны в формулах (5) и альтернативный вариант - (6):

$$V = \{ТФС_1, ТФС_2, ТФС_3\} \quad (5)$$

$$V = \{ТФС_1, ТФС_4, ТФС_3\} \quad (6)$$

Для указанного примера существует вариант обхода (7) и (8):

$$V = \{ТФС_1, ТФС_3, ТФС_2\} \quad (7)$$

$$V = \{ТФС_1, ТФС_3, ТФС_4\} \quad (8)$$

АГ, учитывающий совпадающие участки для такого варианта обхода, будет иметь минимальное количество узлов (Рис. 9).

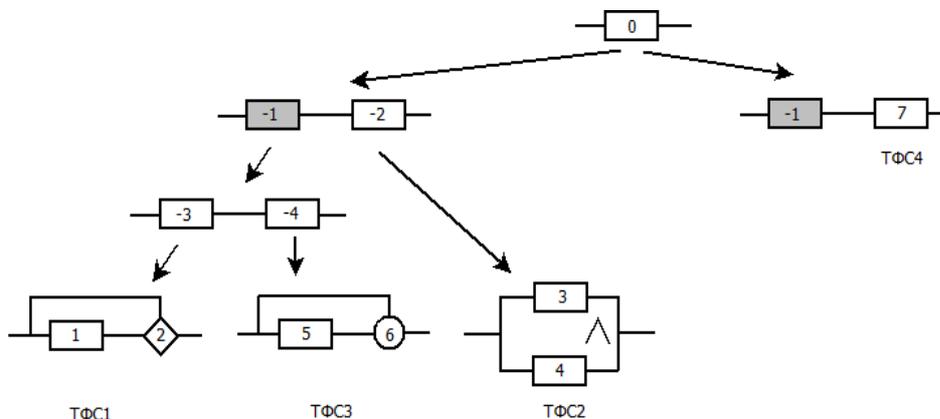


Рис. 9. АГ с минимальным количеством узлов

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены модели, методы и технологии автоматизации проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории и обобщенного структурного метода проф. А.И. Губинского.

Получены следующие результаты:

1) Изоморфные способы представления ПФ ЧМС в виде бинарных отношений элементов, входящих в функциональную сеть, и в виде суперпозиции ТФС;

2) Алгоритм выбора участков функциональной сети, представимых в виде суперпозиции ТФС;

3) Стратегии «нисходящего», «восходящего» и «смешенного» проектирования ПФ ЧМС на функциональных сетях;

4) Гибридная экспертная система, имеющая расширенный функционал, позволяющий строить все изоморфные представления альтернативного графа, генерировать в ручном и автоматическом режимах конкретный алгоритм направленного перебора.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Губинский А.И. Надежность и качество функционирования эргатических систем. Л.: Наука. 1982. – 270 с.
- [2] Губинский А.И., Евграфов В.Г. Информационно-управляющие человеко-машинные системы:

- Исследование, проектирование, испытания: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. – 528 с.
- [3] Губинский А.И., Евграфов В.Г. Эргономическое проектирование судовых систем управления. Л.: Судостроение, 1977. – 224 с.
- [4] Гриф М.Г., Цой Е.Б. Автоматизация проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе метода последовательной оптимизации. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2005. – 264 с.
- [5] Зайков А.В., Кочетов С.А., Гриф М.Г. Методы и средства оптимального проектирования процессов функционирования человеко-машинных систем на основе функционально-структурной теории. Научный вестник НГТУ. 2008. No. 3(32). Новосибирск: Изд-во НГТУ. С. 95–110.
- [6] Гениатулина Е.В., Гриф М.Г. Методы проектирования и моделирования в задачах оптимизации процессов функционирования человеко-машинных систем. Труды СПИИРАН. 2014. No. 5 (36). С.151–167.
- [7] Гриф М.Г., Кочетов С.А., Цой Е.Б. Стратегии проектирования множества альтернатив в задачах оптимизации на основе функционально-структурной теории. Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2015. No. 4 (29). С. 44–51.
- [8] Grif M.G., S.A. Kochetov S.A., Ganelina N.D. Functional -Structural Theory Based Techniques for Human-Machine Systems Optimal Design. 13 International Scientific. Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 39281: proc. Russia, Novosibirsk, 3–6 October 2016. - Novosibirsk, 2016. - Vol. 1. Part 2. – P. 494–497.



**Михаил Геннадьевич Гриф** - родился в 1959 году, профессор кафедры Автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: проектирование сложных систем, компьютерный сурдоперевод.

Опубликовано около 300 научных работ.  
Новосибирск, 630073, просп. К. Маркса, д. 20  
E-mail: [grifmg@mail.ru](mailto:grifmg@mail.ru)



**Станислав Александрович Кочетов** - родился в 1979 году, аспирант кафедры Автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет.

Область научных интересов: проектирование и оптимизация процессов функционирования человеко-машинных систем. Опубликовано более 10 научных работ.  
Новосибирск, 630073, просп. К. Маркса, д. 20  
E-mail: [sa.kochetov@gmail.com](mailto:sa.kochetov@gmail.com)



**Наталья Давидовна Ганелина** защитила кандидатскую диссертацию в 2007 г., в настоящее время работает доцентом кафедры Автоматизированных систем управления, Новосибирский государственный технический университет.

Область научных интересов включает исследование методов анализа данных и бионические методы оптимизации. Опубликовано более 20 научных работ.  
Новосибирск, 630073, просп. К. Маркса, д. 20  
E-mail: [ganelina@corp.nstu.ru](mailto:ganelina@corp.nstu.ru)

Статья поступила 12 марта 2018 г.

## Methods of Designing and Modeling of Human-Machine Systems Based on Functional-Structural Theory

*M. G. Grif, S. A. Kochetov, N. D. Ganelina  
Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

*Abstract* - The article considers models, methods and technologies for automating the design of processes of human-machine systems functioning on the basis of functional-structural theory and generalized structural method of prof. A.I. Gubinsky. As the basic strategies of designing man-machine systems, the ascending, descending and mixed are described. The sequence of performed operations is formed from typical functional units, which can be combined into standard functional structures. A functional network that describes the process of functioning of the human machine system is a collection (superposition) of typical functional structures. Generation of a set of alternative processes of the human-machine system uses the notion of an alternative graph and an algorithm for its bypass. The probabilistic graph, as well as the rules for its reduction (enlargement), with the following characteristics are directly at the heart of the method for assessing the probabilistic indicators of the effectiveness, quality, and reliability of the process of functioning of the SMS: B - probability of correct (error-free) execution, average time T and average costs (income) V from execution. The way of representation of processes of functioning of man-machine systems in the form of binary relations of the elements entering into a functional network is resulted. A general scheme for finding the optimal solution is presented, which takes into account all alternative functional areas, and an optimized algorithm for using a recurring set of parametric alternatives. To find the optimal solution, a modified directional search algorithm is used, within which step-by-step construction of partial solutions is performed. When solving an optimization task, the indicators of efficiency, quality and reliability of both the system as a whole and the individual sections of the functional network are taken into account. The developed hybrid expert system has an expanded

functional allowing to build all isomorphic representations of the alternative graph, to generate in a manual and automatic mode a specific algorithm of directed search.

*Key words* - Functional-structural theory, human-machine system, many alternatives, design automation, design strategies.

## REFERENCES

- [1] Gubinskiy A.I. Nadezhnost' i kachestvo funktsionirovaniya ergaticheskikh sistem. L.: Nauka. 1982. – 270 c.
- [2] Gubinskiy A.I., Yevgrafov V.G. Informatsionno-upravlyayushchiye cheloveko-mashinnyye sistemy: Issledovaniye, proyektirovaniye, ispytaniya: Spravochnik. M.: Mashinostroyeniye, 1993. – 528 c.
- [3] Gubinskiy A.I., Yevgrafov V.G. Ergonomicheskoye proyektirovaniye sudovykh sistem upravleniya. L.: Sudostroyeniye, 1977. – 224 s.
- [4] Grif M.G., Tsoy Ye.B. Avtomatizatsiya proyektirovaniya protsessov funktsionirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove metoda posledovatel'noy optimizatsii. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2005. – 264 s.
- [5] Zaykov A.V., Kochetov S.A., Grif M.G. Metody i sredstva optimal'nogo proyektirovaniya protsessov funktsionirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem na osnove funktsional'no-strukturnoy teorii. Nauchnyy vestnik NGTU. 2008. No. 3(32). Novosibirsk: Izd-vo NGTU. S. 95–110.
- [6] Geniatulina Ye.V., Grif M.G. Metody proyektirovaniya i modelirovaniya v zadachakh optimizatsii protsessov funktsionirovaniya cheloveko-mashinnykh sistem. Trudy SPIRAN. - 2014. - No. 5 (36). - S.151-167.
- [7] Grif M.G., Kochetov S.A., Tsoy Ye.B. Strategii proyektirovaniya mnozhestva al'ternativ v zadachakh optimizatsii na osnove funktsional'no-strukturnoy teorii. Doklady Akademii nauk vysshey shkoly Rossiyskoy Federatsii. - 2015. No. 4 (29). - S. 44-51.
- [8] Grif M.G., S.A. Kochetov S.A., Ganelina N.D. Functional -Structural Theory Based Techniques for Human-Machine Systems Optimal Design. 13 International Scientific. Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) – 39281: proc. Russia, Novosibirsk, 3–6 October 2016. - Novosibirsk, 2016. - Vol. 1. Part 2. – P. 494–497.



**Mikhail Gennadievich Grif** - was born in 1959, Professor of the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University. Area of scientific interests: design of complex systems, computer translation. Published about 300 scientific papers. Novosibirsk, 630073, str. Prosp. K. Marksa, h.20  
**E-mail:** [grifmg@mail.ru](mailto:grifmg@mail.ru)



**Stanislav Aleksandrovich Kochetov** - was born in 1979, graduate student of the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University. Area of scientific interests: design and optimization of the processes of human-machine systems functioning. Published more than 10 scientific papers.

Novosibirsk, 630073, str. Prosp. K. Marksa, h.20

**E-mail:** [sa.kochetov@gmail.com](mailto:sa.kochetov@gmail.com)



**Natalia Davidovna Ganelina** has defended her thesis in 2007, currently she works as an assistant professor of the Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University. The field of scientific interests includes the study of methods of data analysis and bionic optimization methods. Published more than 20 scientific papers.

Novosibirsk, 630073, str. Prosp. K. Marksa, h.20

**E-mail:** [ganelina@corp.nstu.ru](mailto:ganelina@corp.nstu.ru)

The paper was received on March 12, 2018.

## **IV. Измерительные средства и системы. Идентификация. Телемеханика и телеметрия.**

### **Содержание раздела:**

- ◇ Е.В. Рабинович, Г.С. Шефель, А.В. Жуков. Технология построения сейсмических изображений. ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 60–66.
- ◇ Ю.Е. Воскобойников, Д. А. Крысов. Алгоритм идентификация импульсной переходной функции при высоком уровне шума измерения входного сигнала системы. Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия. ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 67–75.

# Технология построения сейсмических изображений

*Е. В. Рабинович, Г. С. Шефель, А. В. Жуков*

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет», Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.

*Аннотация* – Предложена идея оригинальной технологии построения сейсмических изображений. Технология отличается от традиционной структурной устойчивостью решения обратной кинематической задачи сейсморазведки. Она основана на применении алгоритмов работы адаптивных фазированных антенных решеток для обработки сейсмических данных. Предлагается два подхода к обработке. Первый заключается в поиске направления, имеющего максимум диаграммы направленности сейсмической фазированной антенной решетки, в узлах изохроны отражения, в которых осуществляется обнаружение сейсмического импульса. Второй подход использует метод углового сверхразрешения Кейпона, который осуществляет поиск максимума пеленгационного рельефа каждой изохроны отражения.

*Ключевые слова* – сейсморазведка, антенная решетка, метод Кейпона.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных целей сейсмических исследований, направленных на изучение глубинного строения земных недр, является детальное трехмерное изображение строения Земли [1]. Получить такое изображение локального объема геологической среды можно на основе возбуждения в нем упругих волн. Такие волны, распространяясь в толще Земли, взаимодействуют с глубинными границами пластов, составляющих исследуемый объем, и порождают вторичные сейсмические волны различной физической природы (прямые, отраженные, преломленные и др.).

Для построения изображений глубинного строения земных недр (вертикальных и горизонтальных сейсмических разрезов, временных срезов, зоны трещиноватости, возникающей при гидравлическом разрыве пласта, кубов данных и пр.) используются пространственные и временные характеристики пластов горных пород, составляющих земную толщу, а также структура и свойства разделяющих их границ.

Сейсморазведка является основным методом нефтегазовой разведочной геофизики, поскольку дает самое детальное изображение осадочной толщи [2].

В основе построения сейсмических изображений лежат решения прямой и, в первую очередь, обратной кинематических задач сейсморазведки. Эти решения используют кинематические параметры временных полей сейсмических волн, распространяющихся в изучаемой геологической среде, для установления скоростных и геометрических параметров этой трехмерной среды.

Прямая кинематическая задача сейсморазведки заключается в нахождении времен

прихода волн на устройства регистрации (сейсмоприемники), если заданы глубинно-скоростная модель среды, положение источника и момент возбуждения упругой волны.

Обратная кинематическая задача сейсморазведки заключается в нахождении пространственных характеристик границ глубинных пластов, если заданы вид траекторий распространения, скорость и времена прихода волн на сейсмоприемники, а также характеристики кривизны и шероховатости этих границ.

Обратные задачи некорректны, в них нарушено хотя бы одно из условий корректности решения - это условия существования, единственности и устойчивости решения. Поэтому даже приближенное решение обратной кинематической задачи сейсморазведки возможно лишь в рамках некоторых априорных предположений относительно строения и свойств исследуемой среды.

Эти предположения, в первую очередь, реализуются в рамках геометрической сеймики, которая сводит процесс распространения волны к изучению формы волновых фронтов и сейсмических лучей. Такой подход представляет собой предельный случай, когда в волновом уравнении длина волны стремится к нулю, что схематизирует процесс распространения волны, выделяя, прежде всего, движение энергии сейсмического импульса как целого.

Решить обратную кинематическую задачу сейсморазведки означает так подобрать модель среды и оценки ее параметров, чтобы результат решения прямой задачи совпадал с полученными временами прихода отражений от границ глубинных пластов среды. В действительности исходные времена прихода сейсмических волн известны не точно, а с некоторыми погрешностями. Поэтому в качестве критерия для решения обратной задачи используется не наилучшее, а приемлемое по точности совпадение с наблюдаемыми временами [3].

Известно множество алгоритмов приближенного решения обратной кинематической задачи сейсморазведки. Опыт их применения показывает, что при одних и тех же наблюдениях результаты решения могут заметно отличаться друг от друга, что является следствием отсутствия единственности и структурной неустойчивости решения обратной задачи [4].

Таким образом, неустойчивость решений обратной кинематической задачи сейсморазведки приводит к некачественному построению сейсмических изображений.

## II. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

С начала 20-х годов XX века основой технологий построения сейсмических изображений на базе решения обратной кинематической задачи сейсморазведки является интерпретация собранных на поверхности наблюдения данных о временном поле сейсмических волн, отраженных или преломленных от глубинных границ. Это поле регистрируется сейсмоприемниками при неизменном положении источника возбуждений (взрыва или вибратора).

Сейсмические волны регистрируются в точках профиля наблюдения в виде временных рядов (сейсмотрасс), задающих форму волны в виде сейсмических импульсов. Каждая сейсмотрасса является результатом интерференции волн, пришедших на сейсмоприемник.

Далее представление предлагаемой технологии построения сейсмических изображений ведется в сравнении с традиционным решением обратной кинематической задачи сейсморазведки на отраженных волнах, основанном на интерпретации данных, полученных в рамках наиболее распространенного на практике метода общей средней точки (ОСТ).

Изображение одинаково упорядоченных совокупностей импульсов на сейсмотрассах, расположенных последовательно вдоль профиля наблюдения, называют осями синфазности волн. Разным структурам глубинных границ соответствуют разные формы осей синфазности. Первые вступления (начала) импульсов, образующих ось синфазности, располагаются на сейсмограммах вдоль кривых, которые называются годографами.

Годограф волны того или иного типа – зависимость времени распространения волны от расстояния между источником возбуждения и приемником. Для самых простых глубинно-скоростных моделей среды известны аналитические выражения для формы годографов. Для других моделей эти выражения имеют различные приближенные представления.

Интерпретация данных сейсморазведки имеет две основные цели: подбор по наблюдаемым данным модели среды и оценка ее параметров, а также вычисление по полученным годографам осредненных скоростей распространения отраженных волн в среде.

Структура глубинно-скоростной модели среды выявляется в результате прослеживания и корреляции на исходных сейсмограммах интенсивных и протяженных осей синфазности полезных волн. Количество отражающих границ модели соответствует количеству выделенных осей.

Выделение осей синфазности целевых волн позволяет оценить времена их прихода, т. е. аппроксимировать годографы этих волн. Однако эта аппроксимация наблюдаемых годографов характеризуется неопределенностью, связанной с трудностью выявления первых вступлений импульсов в условиях помех и шумов микросейсмической обстановки при регистрации сейсмических сигналов. Присутствующие на сейсмограммах нецелевые волны также увеличивает неопределенность прослеживания осей синфазности.

Процедура выделения осей синфазности полезных волн имеет устойчивое решение только в рамках самой простой горизонтально-слоистой модели среды при постоянной скорости распространения волн и их зеркальном отражении от границ слоев. Данной модели соответствует гиперболический вид наблюдаемых осей синфазности и годографа.

Для получения горизонтальных границ отражения осуществляется спрямление осей синфазности и компенсация нелинейности годографов. Оси спрямляются путем ввода в сейсмотрассы исходных сейсмограмм кинематических поправок – временных сдвигов, соответствующих временам распространения однократно отраженных волн.

Точный расчет кинематических поправок возможен только для известных структурных и скоростных параметров модели среды. Поэтому расчет и ввод кинематических поправок имеет итеративный характер и выполняется многократно, исходя из последующих результатов вычисления скорости распространения волн.

В каждой ОСТ после спрямления годографов и выравнивания временных сдвигов сейсмотрассы суммируются и нормируются, образуя одну сейсмограмму ОСТ.

Результаты интерпретации представляются в виде временного разреза ОСТ – набора сейсмотрасс ОСТ профиля. По приближенным выражениям для полученных форм годографов оцениваются параметры интегральных временных характеристик модели, таких как средняя, эффективная, пластовая скорости, средние градиенты скорости по глубине и/или удалению.

Для глубинно-скоростной модели среды временной разрез ОСТ обладает полным подобием по отношению к реальному глубинному разрезу. Однако уже при одной наклонной границе это

подобие нарушается, и для получения правильного изображения отражающих границ временной разрез ОСТ подвергается дополнительной обработке – миграции.

Сутью сейсмической миграции является продолжение волнового поля, полученного на поверхности наблюдения, в направлении обратном распространению волн. Продолжение осуществляется при помощи решения волнового уравнения. От корректности решения зависит качество сейсмической миграции. Различные сложные вычислительные процедуры сейсмической миграции имеют свои достоинства и недостатки, но все они основаны на упрощенных глубинно-скоростных моделях среды.

Построение мигрированной глубинно-скоростной модели часто является субъективным, особенно в случае, когда мигрированные данные с целью лучшей подгонки модели стараются увязать со скважинными данными. В такой ситуации возникает обычная проблема некорректности решения – существует множество моделей, которые, удовлетворяя зарегистрированным данным, могут привести к одинаковому результату.

Таким образом, технология построения сейсмических изображений на базе решения обратной кинематической задачи сейсморазведки, основанная на процедурах интерпретации и миграции полей сейсмических волн, характеризуется высокой степенью неопределенности оценки параметров моделей. Она базируется, в основном, на простейшей горизонтально-слоистой модели среды и осредненных параметрах ее характеристик.

В данной работе предлагается оригинальная технология построения сейсмических изображений, свободная от некорректности решения обратных задач. Рассмотрение ограничивается только двумерными кинематическими параметрами волн на основе геометрической сеймики продольных отраженных волн. Параметры, связанные с динамикой возбуждения и распространения волн, а также изменением формы и интерференцией сейсмических импульсов полагаются идеальными.

Технология основана на локации (непосредственном измерении) координат точек отражения сейсмических волн от границ пластов исследуемой среды.

Здесь также требуются априорные предположения о характеристиках глубинно-скоростной модели среды. Однако по сравнению с технологией интерпретации и миграции полей сейсмических волн, новая технология позволяет использовать структурно устойчивые алгоритмы построения сейсмических изображений.

### III. ТЕОРИЯ

Методы устойчивого решения задач обнаружения отраженных импульсов при различных условиях возбуждения и приема хорошо изучены в радиолокации. Поэтому идея предлагаемой технологии основана на обнаружении сейсмических импульсов, составляющих форму продольной сейсмической волны, отраженной от глубинной границы среды.

Если такие импульсы обнаружены то, в рамках априорных предположений о свойствах среды, можно осуществить локацию (оценку значений) координат их источников, представляющих точки отражения от глубинной границы среды или излученных в процессе образования трещин при проведении гидравлического разрыва пласта.

По полученным значениям координат можно построить изображение линии границы путем последовательного соединения точек отражения.

Таким образом, совместное использование поля времен отраженных волн, полученного по наблюдательным данным, и результата решения задачи обнаружения отраженных импульсов может обеспечить корректное и устойчивое построение сейсмических изображений.

По полевым данным, подвергнутым предварительной обработке в виде очистки от шумов и помех, регулировки усиления, выявления вида сейсмического импульса и многого другого, производится формирование сейсмограмм, характеризующих волновое поле, созданное источником возбуждения колебаний.

Глубинно-скоростная модель среды, с известным распределением скоростей, представляет закон распространения возмущения от точечного источника колебаний, т. е. с кинематической точки зрения – форму сейсмических лучей и фронтов волн для всех сейсмотрасс. Аналитические выражения для формы лучей и изохрон (кривых равного времени прихода волны от каждого источника колебаний) позволяют задать выражения для оценки кинематических параметров сейсмических импульсов отраженных волн – скорости распространения в среде и координат точек отражения от глубинных границ.

Эти оценки обеспечивают, в рамках заданной глубинно-скоростной модели среды, возможность локации координат точек отражения от глубинной границы среды.

Рассмотрим два метода обнаружения сейсмических импульсов, являющиеся основой локационной технологии построения сейсмических изображений. Это метод квадратурного корреляционного обнаружения сигнала с равномерно распределенной фазой [5] и метод углового сверхразрешения Кейпона [6], позволяющий оценить направление приема сигналов (пеленг источников сигналов) [7].

Локация источников сейсмических импульсов осуществляется совокупностью сейсмоприемников, расположенных на земной поверхности по прямой линии на равных расстояниях друг от

друга. В первом методе эта совокупность используется как простая фазированная антенная решетка, а во втором как адаптивная фазированная антенная решетка.

Использование алгоритмов обработки сигналов фазированными антенными решетками обеспечивает увеличение отношения мощности полезного сигнала к средней мощности шума. Благодаря этому система локации источников сейсмических импульсов способна обнаруживать слабые полезные сигналы с заданного направления на фоне сейсмических помех искусственного и естественного характера. А при использовании адаптивных фазированных антенных решеток подавлять шум «конкурирующих» импульсов, приходящих с других направлений.

Фазированная антенная решетка осуществляет обработку сигналов, которая заключается в формировании выходного сигнала путем суммирования принятых сигналов с весовыми коэффициентами фазовращателей. Диаграммой направленности (ДН) антенной решетки называется зависимость комплексной амплитуды выходного сигнала от направления прихода плоской волны единичной амплитуды.

Задача сейсмической фазированной антенной решетки (СФАР) установить максимум ДН в направлении на узлы сетки локации (размеченные с заданным шагом точки изохрон отражения), в которых будет осуществляться обнаружение сейсмического импульса.

Обнаружение импульса отражения по методу углового сверхразрешения Кейпона осуществляется сейсмической адаптивной фазированной антенной решеткой (САФАР) по максимуму пеленгационного рельефа каждой изохроны отражения.

САФАР обеспечивает, кроме установления максимума ДН в направлении приема ожидаемого полезного сигнала, максимально возможное подавление шума сейсмических импульсов, приходящих с других направлений. При этом число и направления воздействия шумов и помех заранее не известны. САФАР отличается от СФАР тем, что фазовращатели заменяются регулируемые комплексными весовыми коэффициентами, изменяющими входные сигналы, как по амплитуде, так и по фазе. Выбор весовых коэффициентов производится с целью максимального подавления шумов и помех при минимальном ослаблении полезного сигнала.

Форма каждой изохроны отражения вычисляется, в соответствии с глубинно-скоростной моделью среды, по измеренному времени прихода соответствующих ей импульсов отражения, расстоянию между источником колебаний и сейсмоприемником и скоростью распространения волн в среде.

Рассмотрение ограничим, для большей наглядности, простейшей моделью границы однородного слоя с постоянной скоростью распространения сейсмических волн. В этой модели изохрона имеет форму эллипса, а волны распространяются по лучам в виде прямых линий.

Работа СФАР согласно методу квадратурного корреляционного обнаружения импульса отражения осуществляется на основе вычисления суммарных сейсмограмм для заданных узлов – точек, лежащих на изохроне отражения [8].

Для СФАР  $K$ -мерный столбец нормированных коэффициентов фазовращателей имеет вид

$$\mathbf{W}(\psi) = (w_1(\psi), w_2(\psi), \dots, w_K(\psi))^T, \\ w_k^* = \frac{1}{\sqrt{K}} \exp[j \frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d \sin(\psi)],$$

где  $\psi$  – параметр, определяющий значения весовых коэффициентов;  $\lambda$  – длина волны;  $d$  – нормированное по отношению к длине волны расстояние между сейсмоприемниками.

Векторная форма представления нормированных сейсмических импульсов, поступающих на  $K$  сейсмоприемников, имеет вид  $\mathbf{s}(t) = \mathbf{S}(\varphi) \exp(j\omega_0 t)$ , где

$$\mathbf{S}(\varphi) = \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ \dots \\ S_K \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \\ \exp[j \frac{2\pi}{\lambda} d \sin(\varphi)] \\ \dots \\ \exp[j \frac{2\pi}{\lambda} (K-1)d \sin(\varphi)] \end{pmatrix}$$

– вектор комплексных амплитуд;  $\varphi$  – угол падения плоской монохроматической волны на профиль наблюдения;  $\omega_0$  – несущая частота импульса.

Суммарная сейсмограмма  $s(t, \theta)$  вычисляется путем суммирования зарегистрированных сейсмических импульсов с весовыми коэффициентами фазовращателей СФАР, определяемыми задержками распространения сигнала вдоль профиля наблюдения.

$$s(t, \theta) = p(t) \mathbf{W}^H(\psi) \mathbf{S}(\varphi) \exp(j\omega_0 t) = p(t) \sum_{k=1}^K w_k^* S_k \exp(j\omega_0 t) = \\ = \frac{p(t)}{\sqrt{K}} \sum_{k=1}^K \exp[j \frac{2\pi}{\lambda} (k-1)d \sin(\varphi - \psi)] \exp(j\omega_0 t) = \\ = p(t) F(\varphi) \exp[j \frac{2\pi}{\lambda} (K-1)d \sin(\varphi - \psi)] \exp(j\omega_0 t) = \\ = S(t) \exp(j\theta) \exp(j\omega_0 t); \\ |F(\varphi)| = \sqrt{K} \frac{|\sin[\frac{\pi}{\lambda} d (K-1) \sin(\varphi - \psi)]|}{K |\sin[\frac{\pi}{\lambda} d \sin(\varphi - \psi)]|}.$$

Здесь  $|F(\varphi)|$  – амплитудная ДН СФАР;  $p(t)$  – известная функция времени, задающая форму импульса [9]. Верхний индекс «\*» обозначает комплексное сопряжение, « $T$ » – операцию транспонирования, а « $H$ » – эрмитовое сопряжение,

т. е. одновременное выполнение операций транспонирования и комплексного сопряжения.

Модель суммарной сейсмограммы, заданной на интервале  $[0, T]$ , можно представить как колебание, состоящее из суммы квазидетерминированного сейсмического импульса  $s(t, \theta) = S(t) \exp[j(\omega_0 t + \theta)]$  и помехи  $n(t)$ :

$$y(t) = \delta s(t, \theta) + n(t), \quad 0 \leq t \leq T.$$

Здесь  $n(t)$  - центрированный белый гауссов шум со спектральной плотностью мощности  $N(\omega) = 0.5N_0$ .

В квадратурном корреляционном методе обнаружения импульса отражения фаза импульса  $\theta$  предполагается неизвестной, равномерно распределенной на интервале  $[-\pi, \pi]$  случайной величиной.

Задача обнаружения сейсмических импульсов в узлах изохроны отражения, соответствующих максимуму ДН СФАР, осуществляется в соответствии с критерием Байеса, имеющим правило принятия решения, обеспечивающее минимальное значение среднего риска  $C$ . Оно зависит от вероятности правильного обнаружения сигнала  $P_D$  и вероятности неправильного обнаружения сигнала  $P_F$ :  $C \rightarrow \min \Leftrightarrow P_D - \Lambda_0 P_F \rightarrow \max$ .

При решении задач сейсморазведки естественно положить  $\Lambda_0 = \frac{C_{01}}{C_{10}} = 5$ , где  $C_{10}$  - риск пропуска сейсмического импульса;  $C_{01}$  - риск ложной тревоги.

Для принятия решения об обнаружении импульса в узле изохроны отражения, на который сфазирована СФАР, следует вычислить отношение правдоподобия  $\Lambda[y(t)]$  реализации суммарной сейсмограммы  $y(t)$  и сравнить его значение с  $\Lambda_0$ . Если  $\Lambda[y(t)] > \Lambda_0$ , то принимается решение об обнаружении сейсмического импульса ( $\delta = 1$ ), иначе принимается решение, что импульс не обнаружен ( $\delta = 0$ ).

Такая процедура обнаружения реализована в большом числе известных квадратурных корреляторов.

Обнаружение импульса отражения с помощью САФАР осуществляется на основе сканирования ею узлов изохроны отражения, вычисления в них пеленгационного рельефа и выбора узла, отвечающего максимальному значению рельефа.

Модель сейсмограммы, обрабатываемой САФАР, состоящей из  $K$  элементов, может быть представлена следующим образом

$$\mathbf{Z} = \sum_{j=1}^J p_j(t) \mathbf{S}(\varphi_j),$$

где  $J$  - число дискретных источников сейсмических импульсов;  $p_j(t)$  и  $\varphi_j$  - комплексные амплитуда и угол прихода волны, соответствующей индексу  $j$ ;  $\mathbf{S}(\varphi_j)$  -  $K$ -мерный управляющий вектор-гипотеза полезного сигнала, принимаемого решеткой от источника с номером  $j$ ;  $\mathbf{Z}$  -  $K$ -мерный вектор принятого сигнала.

Модель предполагает, что комплексные амплитуды волн различных источников статистически независимы, а сигналы в элементах решетки для каждого источника коррелированы (коэффициент корреляции равен единице). Это значит, что вектор-гипотеза сигнала  $\mathbf{S}(\varphi_j)$  каждого источника является детерминированным и представляет одновременно характер волнового фронта и конфигурацию САФАР.

Вектор весовых коэффициентов фазовращателей САФАР, минимизирующий среднюю мощность на выходе антенны по критерию Кейпона имеет вид

$$\mathbf{W} = \frac{\mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)}{\mathbf{S}^H(\varphi) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)}.$$

Отношение сигнал/шум для САФАР вычисляется по формуле  $Q = \mathbf{S}^H(\varphi) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)$ , где  $\mathbf{R}$  - максимально правдоподобная выборочная оценка корреляционной матрицы входных сейсмических импульсов.

Построение пеленгационного рельефа осуществляется при сканировании вектором-гипотезой углового сектора, содержащего источник сейсмического импульса и/или помехи любого рода в узлах изохроны отражения. В направлении, отличном от направления на помеху, последняя успешно подавляется и отношение сигнал/шум на выходе антенны получается высоким. Когда вектор-гипотеза  $\mathbf{S}(\varphi_j)$  в процессе сканирования попадает на помеху, подавления последней не происходит и отношение  $Q$  падает.

Разрешающей функцией или функцией рельефа САФАР, используемой в алгоритме Кейпона, является зависимость величины, обратной  $Q$ , от угловой координаты  $\varphi$ :

$$\mu(\varphi) = \frac{1}{\mathbf{S}^H(\varphi) \mathbf{R}^{-1} \mathbf{S}(\varphi)}.$$

Функция рельефа подобного вида дает возможность оценить изменение амплитуды отраженных сейсмических импульсов с изменением расстояния между источником возбуждения колебаний и сейсмоприемником, что может использоваться как углеводородный индикатор для газа.

САФАР, оптимизированная по критерию Кейпона стремится подавить любой мешающий источник сейсмического импульса, волновой фронт которого отличается от вектора-гипотезы импульса  $\mathbf{S}(\varphi)$ . Поэтому средняя мощность на выходе решетки минимальна везде, кроме узкой области углов, где располагается  $j$ -й источник сейсмического импульса. Непосредственно в направлении на этот источник функция  $\mu(\varphi)$

имеет максимум, поскольку волновой фронт источника  $S(\varphi_j)$  совпадает с вектором  $S(\varphi)$ , а коэффициент передачи САФАР фиксирован и равен единице. Следовательно, сигнал от  $j$ -го источника сейсмического импульса не может быть подавлен.

В заключение следует отметить, что локация по методу углового сверхразрешения Кейпона может быть настроена на обнаружение источников сейсмических импульсов в условиях различных глубинно-скоростных моделей среды.

В рамках одной модели среды локация источников сейсмических импульсов может осуществляться не только для отраженных волн, но и для дифрагированных и многократно отраженных волн, а также в ситуациях, связанных с различными локальными отклонениями от базовой модели границ отражения и/или нарушениями ее свойств. Сюда можно отнести выклинивающиеся пласты, дизъюнктивные нарушения, линзы, диапировые структуры и др.

Дополнительная разрешающая способность локации обеспечивается за счет возможности двухэтапной процедуры пеленгации: на первом этапе – перебор векторов-гипотез с относительно большим шагом по узлам основной изохроны отражения. После обнаружения локальных искажений границы можно провести второй этап более детальной фазировки САФАР на объекты среды, отличающиеся отражающими свойствами.

#### IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В статье изложена основная идея принципиально новой сейсморазведочной технологии, предназначенной для построения сейсмических изображений и некоторые теоретические основания для ее реализации. Технология позволяет устранить или уменьшить неоднозначности, имеющие место при решении обратной кинематической задачи сейсморазведки традиционной технологией построения сейсмических изображений.

Технология имеет целью разведку неисследованных районов для выявления потенциальных нефтегазоносных структур, а также для получения информации об уже эксплуатирующихся или подвергнутых гидравлическому разрыву продуктивных пластах. Применение локационной технологии может обеспечить построение сложных геологических моделей нефтегазовых и иных месторождений. Она может использоваться в условиях взрывной, импульсной и вибрационной сейсморазведки.

За рамками статьи остались материалы, связанные с особенностями практической реализацией технологии. Также не производилось сравнение предложенной и традиционной технологий в различных аспектах,

таких как производственные, вычислительные и материальные затраты, точность и разрешающая способность алгоритмов построения сейсмических изображений. Эти материалы послужат основой дальнейших публикаций.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пузырев Н.Н. Интерпретация данных сейсморазведки методом отраженных волн. М.: Гостехиздат, 1959. 452 с.
- [2] Воскресенский Ю.Н. Построение сейсмических изображений. М.: РГУ НГ, 2006. 117 с.
- [3] Глоговский В. М., Лангман С. Л. Свойства решения обратной кинематической задачи сейсморазведки. Технологии сейсморазведки. Новосибирск. ИНГГ им. А.А. Трофимука СО РАН, Т. 1. 2009. С. 10–17.
- [4] Глоговский В.М., Мешбей В.И., Цейтлин М.И., Лангман С.Л. Кинематико-динамическое преобразование сейсмической записи для определения скоростного и глубинного строения среды. Сборник докладов второго научного семинара стран-членов СЭВ по нефтяной геофизике. Т. 1. Сейсморазведка. М.: 1982. С. 327–331.
- [5] Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. М.: Радио и связь. 1983. 320 с.
- [6] Caron J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. Proc. IEEE, vol. 57, no. 8, p. 1408–1418. August 1969.
- [7] Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. – М.: Радио и связь, 2003. – 200 с.
- [8] Рабинович Е.В., Туркин А.С., Новаковский Ю.Л. Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта. Доклады ТУСУР. 2012. № 1(25). Ч. 1. С. 104–112.
- [9] Рабинович Е.В., Ганчин К.С., Пупышев И.М., Шефель Г.С. Модель сейсмического импульса, возникающего при гидравлическом разрыве пласта. Математические структуры и моделирование. 2014. № 4. С. 107–113.



**Евгений Владимирович Рабинович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника» НГТУ. Автор более 100 научных работ. Научные интересы: цифровая обработка сигналов, моделирование нелинейных динамических систем. Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.  
E-mail: [Rabinovich@corp.nstu.ru](mailto:Rabinovich@corp.nstu.ru)



**Григорий Самуилович Шефель**, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры «Высшая математика» НГТУ. Автор 20 научных работ. Научные интересы: теория отображений. Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.

E-mail: [ligr1x@yahoo.com](mailto:ligr1x@yahoo.com)



**Андрей Владимирович Жуков**, студент кафедры «Вычислительная техника» НГТУ. Научные интересы: цифровая обработка сигналов. Новосибирск, Россия. 630090, просп. К. Маркса, д. 20.

Статья получена 25 апреля 2018 г.

## Seismic Imaging Technology

*E. V. Rabinovich, G. S. Shefel, A. V. Zhukov*

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia. 630090, str. Prosp. K. Marksa, h. 20.

*Abstract:* The idea of the original seismic imaging technology is proposed. The technology differs from the traditional structural stability of the solution of the inverse kinematic seismic task. It is based on the application of algorithms for the operation of adaptive phased antenna arrays for the processing of seismic data. There are two approaches to processing. The first is to find the direction having the maximum of the directional diagram of the seismic phased array antenna at the reflection isochron nodes in which the seismic pulse is detected. The second approach uses the method of the angular superresolution of Keipon, which searches for the maximum of the direction-finding relief of each reflection isochron.

*Key words* - seismic prospecting, antenna array, Keipon method.

## REFERENCES

- [1] Puzyrev N.N. Interpretatsiya dannykh seysmorazvedki metodom otrazhennykh voln. M.: Gostoptekhizdat, 1959. 452 s.
- [2] Voskresenskiy YU.N. Postroyeniye seysmicheskikh izobrazheniy. M.: RGU NG, 2006. 117 s.
- [3] Glogovskiy V. M., Langman S. L. Svoystva resheniya obratnoy kinematicheskoy zadachi seysmorazvedki. Tekhnologii seysmorazvedki. Novosibirsk. INGG im. A.A. Trofimuka SO RAN, T. 1. 2009. C. 10–17.
- [4] Glogovskiy V.M., Meshbey V.I., Tseytlin M.I., Langman S.L. Kinematiko-dinamicheskoye preobrazovaniye seysmicheskoy zapisi dlya opredeleniya skorostnogo i glubinnogo stroyeniya sredey. Sbornik dokladov vtorogo nauchnogo seminaru stran-chlenov SEV po neftyanoy geofizike. T. 1. Seysmorazvedka. M.: 1982. S. 327–331.
- [5] Tikhonov V.I. Optimal'nyy priyem signalov. M.: Radio i svyaz'. 1983. 320 s.
- [6] Capon J. High-Resolution Frequency-Wavenumber Spectrum Analysis. Proc. IEEE, vol. 57, no. 8, p. 1408–1418. August 1969.
- [7] Ratynskiy M.V. Adaptatsiya i sverkhrazresheniye v antennoykh reshetkakh. – M.: Radio i svyaz', 2003. – 200 s.
- [8] Rabinovich Ye.V., Turkin A.S., Novakovskiy YU.L. Nazemnaya lokatsiya mikroseymsicheskikh signalov dlya monitoringa gidravlicheskogo razryva plasta. Doklady TUSUR. 2012. № 1(25). CH. 1. C. 104–112.
- [9] Rabinovich Ye.V., Ganchin K.S., Pupyshev I.M., Shefel' G.S. Model' seysmicheskogo impul'sa, vznikayushchego pri gidravlicheskoy razryve plastayu Matematicheskiye struktury i modelirovaniye. 2014. № 4. S. 107–113.



**Evgeny Vladimirovich Rabinovich**, Doctor of technical sciences, Professor, professor of the Department "Computer Science" of the NSTU. Author of more than 100 scientific works. Scientific interests: digital signal processing, modeling of nonlinear dynamic systems.

Novosibirsk, Russia. 630090, str. K. Marksa, 20.

E-mail: [Rabinovich@corp.nstu.ru](mailto:Rabinovich@corp.nstu.ru)



**Grigoriy Samuilovich Shefel**, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Higher Mathematics Department of the NSTU. Author of 20 scientific works. Scientific interests: mapping theory.

Novosibirsk, Russia. 630090, str. K. Marksa, 20.

E-mail: [ligr1x@yahoo.com](mailto:ligr1x@yahoo.com)



**Andrey Vladimirovich Zhukov**, student of the department "Computer Science" of the NSTU. Scientific interests: digital signal processing.

Novosibirsk, Russia. 630090, str. K. Marksa, 20.

The paper was received on April 25, 2018.

# Алгоритм идентификация импульсной переходной функции при высоком уровне шума измерения входного сигнала системы

Ю.Е. Воскобойников<sup>1,2</sup>, Д. А. Крысов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, просп. Карла Маркса, д.20, Новосибирск, Россия

*Аннотация* – В качестве модели стационарной динамической системы часто выступает интегральное уравнение Вольтера первого рода с разностным ядром. Для такой модели задача непараметрической идентификации заключается в оценивание этого разностного ядра (называемого импульсной переходной функцией) по измеренным значениям входного и выходного сигналов идентифицируемой динамической системы. Как известно, эта задача является некорректно поставленной, т.е. решение может не существовать, быть не единственным и обладать неустойчивостью по отношению к погрешностям (шумам измерения) исходных данных. Для получения единственного устойчивого (но приближенного) решения используются различные методы регуляризации, в частности метод регуляризации А.Н. Тихонова. При этом (применительно к рассматриваемой задаче идентификации) предполагают, что входной сигнал (ядро интегрального уравнения) задан точно, а выходной сигнал системы регистрируется с некоторой случайной ошибкой. Однако такое предположение редко выполняется на практике так, как и входной и выходной сигналы системы измеряются с случайными погрешностями – шумами измерений. Не учет шума измерения входного сигнала идентифицируемой системы приводит к увеличению ошибки идентификации по сравнению с оптимальной (т.е. минимально возможной ошибкой идентификации). В данной работе предлагается устойчивый алгоритм идентификации, в котором шум измерения входного сигнала (также, как и шум измерения выходного сигнала) учитывается как при построении самого регуляризованного решения, так и при выборе параметра регуляризации. Этот параметр существенно влияет на точность получаемых регуляризованных решений. Поэтому в работе строится статистический алгоритм выбора параметра регуляризации, учитывающий дисперсию шума измерения входного сигнала и позволяющий с приемлемой точностью оценить оптимальное значение параметра регуляризации. Выполненный вычислительный эксперимент показал более высокую точность предложенного алгоритма идентификации по сравнению с регуляризирующими алгоритмами, которые не учитывают шум измерения входного сигнала.

*Ключевые слова:* задача непараметрической идентификации, интегральное уравнение Вольтера I рода, некорректно поставленные задачи, регуляризирующий алгоритм идентификации, параметра регуляризации, ошибки регуляризованного решения задачи идентификации, оценивание оптимального параметра регуляризации, эффективность предложенного алгоритма идентификации.

## 1. ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для описания динамики стационарной динамической системы достаточно часто в качестве математической модели используется интегральное уравнение Вольтера I рода с разностным ядром:

$$\int_0^t k(t-\tau)\varphi(\tau)d\tau = f(t), \quad (1)$$

где  $k(\tau)$  – импульсная переходная функция (ИПФ) динамической системы,  $\varphi(\tau), f(t)$  – входной и выходной сигналы системы. С уравнением (1) связаны две часто встречаемые на практике задачи:

- *обратная измерительная задача*, когда необходимо построить оценку для входного сигнала  $\varphi(\tau)$  по зарегистрированным значениям функций  $k(\tau), f(t)$ , т.е. решить уравнение (1) относительно функции  $\varphi(\tau)$ ;

- *задача непараметрической идентификации*, где необходимо построить оценку для ИПФ системы по зарегистрированным значениям функций  $\varphi(\tau), f(t)$ .

Заметим, что как первая, так и вторая задачи относятся к классу некорректно поставленных задач, когда могут нарушаться условия корректности по Адамару, в частности, появляется неустойчивость решения интегрального уравнения к погрешностям задания правой части  $f(t)$  уравнений (1) [1,2].

Для построения эффективного вычислительного алгоритма решения уравнения (1) выполняют его дискретизацию с использованием формулы прямоугольников. Это позволяет в дальнейшем использовать дискретное преобразование Фурье (ДПФ). Для задачи непараметрической идентификации такая дискретизация дает систему уравнений:

$$\Phi k = f, \quad (2)$$

где матрица  $\Phi$  формируется из значений входного сигнала. Эта матрица плохо обусловлена (а возможно и вырождена), что создает известные трудности решения системы (2).

Для нахождения единственного и устойчивого решения обратной измерительной задачи (т.е. решения уравнения (1) относительно функции  $\varphi(\tau)$ ) используют различные методы регуляризации, как детерминированные, так и статистические [3]. При этом, как правило, предполагают, что правая часть известна с некоторой погрешностью, а ядро  $k(\tau)$  уравнения (1) задано точно. Эти же методы можно использовать и для решения задачи непараметрической идентификации, но уже в этом случае ядром уравнения будет уже входной сигнал системы  $\varphi(\tau)$ . При этом делается аналогичное предположение, что входной сигнал идентифицируемой системы задан точно. Однако такое условие редко выполняется на практике так, как и входной и выходной сигналы системы измеряются и регистрируются приборами примерно одинакового класса точности и, следовательно, и входной и выходной сигналы задаются с случайными погрешностями – шумами измерений. Поэтому возникает ряд вопросов, связанных как с построением самого регуляризирующего алгоритма, так и свойствами регуляризованных оценок для ИПФ в этой непростой ситуации.

В работе [4] было показано, что если относительный уровень шума измерения входного сигнала меньше или соизмерим с относительным уровнем шума измерения выходного сигнала идентифицируемой системы, то можно использовать регуляризирующий алгоритм, который не учитывал погрешности входного сигнала, включая алгоритм выбора параметра регуляризации. Если же уровень шума измерения входного сигнала был больше (в разы) уровня шума измерения выходного сигнала, то алгоритм оценивания оптимального параметра регуляризации, построенный на основе критерия оптимальности уже приводил к завышенным значениям, как и другой алгоритм выбора, построенный на основе принципа невязки.

Поэтому в данной работе решаются задачи:

- построение на основе дискретного преобразования Фурье (ДПФ) регуляризирующего алгоритма, учитывающего шум измерения входного сигнала идентифицируемой системы;
- обобщение критерия оптимальности регуляризирующего алгоритма на случай неточно заданного ядра интегрального уравнения;
- построение на основе этого критерия алгоритма оценивания оптимального параметра регуляризации, минимизирующего средне-

квадратическую ошибку идентификации импульсной переходной функции.

## 2. РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ ИПФ

Предположим, что измеренные значения входного и выходного сигнала  $\tilde{\varphi}(\tau_j) \tilde{f}(t_i)$  допускают представления:

$$\begin{aligned} \tilde{\varphi}_j &= \varphi(\tau_j) + \zeta(\tau_j), j = 1, \dots, N_\varphi; \\ \tilde{f}_i &= f(t_i) + \eta(t_i), i = 1, \dots, N_f. \end{aligned}$$

где  $\zeta(\tau_j), \eta(t_i)$  - случайные величины (шумы измерений) с нулевыми средними и дисперсиями  $\sigma_\zeta^2, \sigma_\eta^2$  и величины  $\eta(t_i), \zeta(\tau_j)$  не коррелированы друг с другом. Здесь и далее знак «~» означает, что данная величина искажена шумом измерения.

Построение регуляризованного решения можно представить следующими «укрупненными» шагами (подробнее см. [5]):

*Шаг 1.* Формирование по дискретным значениям  $\tilde{f}_i = f(t_i), \tilde{\varphi}_j = \varphi(\tau_j)$  периодических последовательностей  $\tilde{f}_p(i), \tilde{\varphi}_p(i), i = 0, \dots, N-1$ , где  $N$  - величина периода и взятия от этих последовательностей ДПФ, т.е. вычисление коэффициентов ДПФ  $\tilde{F}_p(l), \tilde{\Phi}_p(l), l = 0, \dots, N-1$ .

*Шаг 2.* Вычисление коэффициентов ДПФ  $\hat{K}_{p\alpha}(l), l = 0, \dots, N-1$ , регуляризованного решения.

*Шаг 3.* Вычисление периодического регуляризованного решения  $\hat{k}_{p\alpha}(i), i = 0, \dots, N-1$  (взятием обратного ДПФ от последовательности  $\{\hat{K}_{p\alpha}(l)\}$ ) и формирование вектора непериодического регуляризованного решения  $\hat{k}_{\alpha_j}, j = 0, \dots, N_k-1$  как оценку для значений импульсной переходной функции в дискретные моменты времени:  $k(\tau_j), j = 0, \dots, N_k-1$ .

Очевидно, что точность идентификации определяется способом вычисления  $\hat{K}_{p\alpha}(l)$  на втором шаге регуляризирующего алгоритма.

Если входной сигнал идентифицируемой системы задан точно или шум измерения пренебрежительно мал (см. [4]), то на шаге 2 используется следующее выражение:

$$\hat{K}_{p\alpha}(l) = \frac{\Phi_p^c(l)}{|\Phi_p(l)|^2 + \alpha \cdot Q_p(l)} \cdot \tilde{F}_p(l), \quad (3)$$

где  $\alpha$  - параметр регуляризации,  $\Phi_p^c(l)$  - величина, комплексно-сопряженная с  $\Phi_p(l)$ .

Элементы последовательности  $\{Q_p(l)\}$  формируются по правилу:

$$Q_p(l) = \begin{cases} Q(l \cdot \Delta_\omega), & l = 0, \dots, N/2; \\ Q((N-l) \cdot \Delta_\omega), & l = N/2 + 1, \dots, N-1, \end{cases}$$

где  $\Delta_\omega = 2\pi / (N\Delta_t)$  – шаг дискретизации в частотной области. Функцию  $Q(\omega)$  можно трактовать как частотную характеристику стабилизирующего функционала: она должна быть неубывающей функцией частоты  $\omega$  и чаще всего  $Q(\omega) \rightarrow \infty$  при  $\omega \rightarrow \infty$ . Если задан порядок регуляризации  $r$ , то при достаточно больших значениях  $\omega$  справедлива асимптотика  $Q(\omega) \approx \omega^{2r}$ .

На основе подхода, изложенного в [5,6] для решения обратной измерительной задачи в этой работе было получено нелинейное уравнение относительно искомого коэффициента ДПФ  $\hat{K}_{p\alpha}(l)$ :

$$\hat{K}_{p\alpha}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + \alpha(\sigma_\zeta^2 |\hat{K}_{p\alpha}(l)|^2 + \sigma_\eta^2) \cdot Q_p(l)} \cdot \tilde{F}_p(l),$$

$l = 0, 1, \dots, N-1$ . Введем отношение дисперсий  $\theta = \sigma_\zeta^2 / \sigma_\eta^2$  и перепишем это уравнение в виде

$$\hat{K}_{p\alpha}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + \alpha(1 + \theta |\hat{K}_{p\alpha}(l)|^2) \cdot Q_p(l)} \cdot \tilde{F}_p(l), \quad (4)$$

Заметим, что задать отношение  $\theta$  проще, чем дисперсии  $\sigma_\zeta^2, \sigma_\eta^2$  в отдельности. Так, если известно, что уровень шума  $\eta(t)$  в два раза больше уровня  $\zeta(t)$ , то отношение  $\theta = (0.5)^2 = 0.25$ . Заметим, что если входной сигнал идентифицируемой системы задан точно, т.е.  $\theta = 0$ , то выражение (4) переходит в выражение (3) (что и следовало ожидать).

Можно показать, что это нелинейное уравнение (4) имеет единственное решение при значениях  $\alpha \geq 0, \theta \geq 0$ . Для нахождения решения  $\hat{K}_{p\alpha}^*(l)$  нелинейного уравнения при фиксированном параметре регуляризации  $\alpha$  можно использовать любой алгоритм решения нелинейного уравнения. Например, схему простой итерации:

$$\hat{K}_{p\alpha}^{(n+1)}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + \alpha(1 + \theta |\hat{K}_{p\alpha}^{(n)}(l)|^2) \cdot Q_p(l)} \cdot \tilde{F}_p(l),$$

$n = 0, 1, \dots$ . «Точка старта»  $\hat{K}_{p\alpha}^{(0)}(l)$  задается как

$$\hat{K}_{p\alpha}^{(0)}(l) = \frac{\tilde{\Phi}_p^c(l)}{|\tilde{\Phi}_p(l)|^2 + \alpha \cdot Q_p(l)} \cdot \tilde{F}_p(l),$$

$l = 0, 1, \dots, N-1$ . (5)

Условие прекращения итераций имеет вид

$$\left[ \frac{\sum_{l=0}^{N-1} |\hat{K}_{p\alpha}^{(n+1)}(l) - \hat{K}_{p\alpha}^{(n)}(l)|^2}{\sum_{l=0}^{N-1} |\hat{K}_{p\alpha}^{(n)}(l)|^2} \right] \leq 0.01 \quad (6)$$

Вычислительный эксперимент показал, что для выполнения условия (6) обычно требуется не более 5–8 итераций.

### 3. ВЫБОР ПАРАМЕТРА РЕГУЛЯРИЗАЦИИ

Проблема выбора параметра регуляризации  $\alpha$  является основной при использовании регуляризирующих алгоритмов идентификации на практике. Дело в том, при заниженных значениях  $\alpha$  в решении  $\hat{k}_\alpha(\tau)$  будут присутствовать шумовые составляющие, обусловленные шумами входного и выходного сигналов. При завышенных значениях  $\alpha$  из решения  $\hat{k}_\alpha(\tau)$  будут «удалены» информативные компоненты функции  $k(\tau)$ . Поэтому в качестве оптимального значения  $\alpha_{opt}$  примем значение, доставляющее минимум функционалу среднеквадратической ошибки [5]:

$$\Delta(\alpha) = M \left[ \left\| \hat{k}_\alpha - \bar{k}^+ \right\|^2 \right],$$

где  $M[\cdot]$  – оператор математического ожидания по ансамблям шумов измерений, вектор  $\bar{k}^+$  – нормальное псевдорешение, вычисляемое по точным значениям входного и выходного сигнала и коэффициенты ДПФ которого определяются выражением:

$$\bar{K}_{p\alpha}^+(l) = \frac{\Phi_p^c(l)}{|\Phi_p(l)|^2} \cdot F_p(l), \quad l = 0, 1, \dots, N-1.$$

Вычисление  $\alpha_{opt}$  требует задания дискретных значений функции  $k(\tau)$ , которые на практике не известны. Поэтому было предложено (для случая точно заданного ядра интегрального уравнения) несколько алгоритмов выбора параметра регуляризации, позволяющих более или менее удачно оценить  $\alpha_{opt}$  (например, [7,8]). В работах [3,9] для оценивания  $\alpha_{opt}$  был предложен критерий оптимальности линейного регуляризирующего алгоритма, который в дальнейшем являлся теоретической основой для построения алгоритмов оценивания  $\alpha_{opt}$  при решении конкретных практических задач (например, см. [5]). Приведем только основные

понятия и соотношения, необходимые для понимания этого критерия при решении задачи непараметрической идентификации.

Предположим, что входной сигнал задан точно и введем статистику:

$$\rho_W(\alpha) = \tilde{f}^T V_\eta^{-1} e_\alpha, \quad (7)$$

где  $e_\alpha = \tilde{f} - \Phi \hat{k}_\alpha$  - вектор невязки,  $\Phi$  - матрица системы уравнений (2),  $\hat{k}_\alpha$  - вектор, составленный из значений регуляризованного решения  $\hat{k}_\alpha(\tau_j)$ ,  $V_\eta$  - ковариационная матрица вектора шума измерения выходного сигнала (в случае некоррелированного шума  $V_\eta = \sigma_\eta^2 \cdot I$ ,  $I$  - единичная матрица). Тогда в качестве оценки для  $\alpha_{opt}$  принимается величина  $\alpha_w$ , для которой выполняется неравенство

$$\vartheta_m(\beta/2) \leq \rho_W(\alpha_w) \leq \vartheta_m(1-\beta/2), \quad (8)$$

где  $\vartheta_m(\beta/2)$ ,  $\vartheta_m(1-\beta/2)$  - квантиль  $\chi^2$ -распределения с  $m = N_f$  степенями свободы уровней  $\beta/2$  и  $1-\beta/2$ ,  $\beta$  - вероятность ошибки первого рода (обычно 0.05) при проверке статистической гипотезы об оптимальности значения  $\alpha_w$ .

Для вычисления значения  $\alpha_w$ , удовлетворяющего неравенству (8) можно использовать итерационную процедуру относительно величины  $\gamma = 1/\alpha$  вида

$$\gamma^{(n)} = \gamma^{(n-1)} - \frac{R_W(\gamma^{(n-1)}) - m}{R'_W(\gamma^{(n-1)})}, n = 1, 2, \dots, \quad \gamma^{(0)} \ll 1 \quad (9)$$

где  $m = N_f$ ,  $R_W(\gamma) = \rho_W(1/\gamma)$ ,

$$\tilde{R}'_W(\gamma) = \frac{d}{d\gamma} \tilde{R}_W(\gamma). \quad \text{В качестве значения}$$

$\alpha_w$  принимается  $\alpha_w = 1/\gamma_w$ ,  $\gamma_w = \gamma^{(n)}$ , где  $\gamma^{(n)}$  - значение  $\gamma$  на  $n$ -ой итерации, удовлетворяющее условию

$$\vartheta_m(\beta/2) \leq R_W(\gamma^{(n)}) \leq \vartheta_m(1-\beta/2). \quad (10)$$

Это означает, что итерационная процедура (9) прекращается, как только выполнится условие (10). Заметим, что (9) является итерационной процедурой нахождения приближенного решения нелинейного уравнения,  $R_W(\gamma) = \rho_W(1/\gamma) = m$  окончание которой определяется не «традиционным» условием (10).

В работе [5] предложен эффективный алгоритм вычисления значений функций  $R_W(\gamma)$ ,  $R'_W(\gamma)$  через соответствующие коэффициенты ДПФ (напомним, что здесь

полагается точное задание значений входного сигнала, т.е.  $\sigma_\zeta^2 = 0$ ):

$$R_W(\gamma) = \frac{N}{\sigma_\eta^2} \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \frac{Q_p(l)}{\gamma |\Phi_p(l)|^2 + Q_p(l)} \cdot |\tilde{F}_p(l)|^2,$$

$$R'_W(\gamma) = -\frac{N}{\sigma_\eta^2} \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \frac{Q_p(l) |\Phi_p(l)|^2}{[\gamma |\Phi_p(l)|^2 + Q_p(l)]^2} \cdot |\tilde{F}_p(l)|^2.$$

Видно, что эти соотношения требуют только порядка  $N$  вычислительных операций, что обеспечивает высокую вычислительную эффективность вычисления значения  $\gamma_w$  и соответственно  $\alpha_w = 1/\gamma_w$ . Показано, что  $\alpha_w$  гораздо точнее оценивает  $\alpha_{opt}$  по сравнению с другими алгоритмами выбора параметра регуляризации (подробнее см. [5,10]). Для иллюстрации изложенного алгоритма выбора параметра регуляризации на рис. 1 приведены следующие «характерные» кривые: кривая 1 - зависимость относительной ошибки

идентификации  $\delta_k(\gamma) = \frac{\|\hat{k}_{1/\gamma} - \bar{k}^+\|}{\|\bar{k}^+\|}$  от

величины  $\gamma$ , кривая 2 - значений функции  $R_W(\gamma)$ , прямые 3 - квантили  $\vartheta_m(\beta/2)$ ,  $\vartheta_m(1-\beta/2)$ . Видно, что значения  $\gamma$ , при которых выполняется неравенство (10) соответствуют области минимальных значений относительной ошибки идентификации (относительный уровень шума измерения правой части в этом эксперименте был равен 0.03).

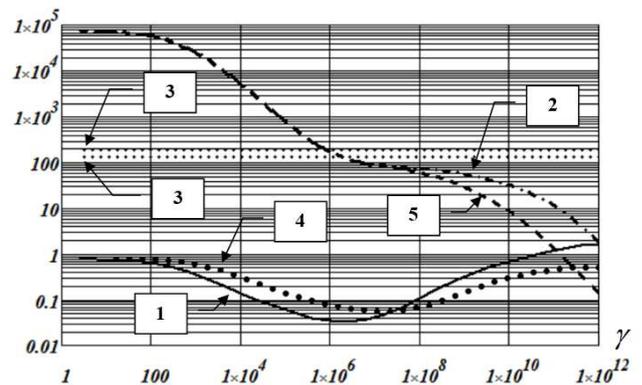


Рис. 1. Иллюстрация алгоритма выбора параметра  $\gamma$

Попытаемся непосредственно использовать этот критерий для выбора параметра регуляризации при неточно заданном входном сигнале. На Рис. 1 кривая 4 показывает значения относительной ошибки идентификации, которая соответствует относительным уровням шумов: выходного сигнала 0.03, входного сигнала - 0.20. Видно, что ошибка идентификации увеличилась и минимум ошибки сдвинулся вправо, а функция  $R_W(\gamma)$  (кривая 5)

удовлетворяет условию (10) при тех же значения  $\gamma_w$ , что и при точном входном сигнале. Таким образом, использование изложенного выше алгоритма выбора параметра регуляризации не позволяет достаточно точно оценить оптимальный параметр регуляризации при значительном уровне шума входного сигнала.

Попытаемся модифицировать изложенный алгоритм для случая неточно заданного входного сигнала. Для этого воспользуемся подходом работы [6], в которой решалась обратная задача при неточно заданном ядре интегрального уравнения (1). Заменяем в статистике (7) ковариационную матрицу  $V_\eta$  на ковариационную матрицу  $V_{\eta'}(k_\alpha)$  «эквивалентного» вектора погрешностей правой части:

$$\begin{aligned} \tilde{\rho}_w(\alpha) &= \tilde{f} \cdot (V_{\eta'}(k_\alpha))^{-1} \cdot e_\alpha = \\ &= \tilde{f} \cdot [\sigma_\eta^2 \cdot I + \sigma_\xi^2 \cdot K_\alpha K_\alpha^T]^{-1} \cdot e_\alpha \end{aligned} \quad (11)$$

где матрица  $K_\alpha$  составлена из значений вектора регуляризованного решения  $k_\alpha$ . Для вычисления значения  $\alpha_w$ , удовлетворяющего неравенству

$$\vartheta_m(\beta/2) \leq \tilde{\rho}_w(\alpha) \leq \vartheta_m(1-\beta/2), \quad (12)$$

вновь обратимся к итерационной процедуре относительно величины  $\gamma = 1/\alpha$  вида

$$\gamma^{(n)} = \gamma^{(n-1)} - \frac{\tilde{R}_w(\gamma^{(n-1)}) - m}{\tilde{R}'_w(\gamma^{(n-1)})}, \quad \gamma^{(0)} \ll 1, \quad n=1, 2, \dots, \quad (13)$$

где  $m = N_f$ ,  $\tilde{R}_w(\gamma) = \tilde{\rho}_w(1/\gamma)$ ,

$\tilde{R}'_w(\gamma) = \frac{d}{d\gamma} \tilde{R}_w(\gamma)$ . В качестве значения  $\alpha_w$

принимается  $\alpha_w = 1/\gamma_w$ ,  $\gamma_w = \gamma^{(n)}$ , где  $\gamma^{(n)}$  удовлетворяет условию

$$\vartheta_m(\beta/2) \leq \tilde{R}_w(\gamma^{(n)}) \leq \vartheta_m(1-\beta/2). \quad (14)$$

Это означает, что итерационная процедура (13) прекращается, как только выполнится условие (14). Обычно  $\gamma^{(0)} \approx 10^{-15}$  и для вычисления  $\alpha_w$  требуется не более 4–5 итераций процедуры (13).

Предлагается эффективный алгоритм вычисления  $\tilde{R}_w(\gamma)$  через коэффициенты ДПФ:

$$\tilde{R}_w(\gamma) = N \cdot \sum_{l=0}^{N-1} \frac{(1+\theta |\hat{K}_{p\alpha}^*(l)|^2) \cdot Q_p(l) \cdot |F_p(l)|^2}{\gamma |\hat{\Phi}_p(l)|^2 + (1+\theta |\hat{K}_{p\alpha}^*(l)|^2) \cdot Q_p(l)}, \quad (15)$$

$$(C_\sigma \sigma_\xi^2 |\hat{K}_{p\alpha}^*(l)|^2 + \sigma_\eta^2)$$

где  $C_\sigma = \frac{N_\varphi}{N_f} \cdot N^2 \cdot \Delta_l^2$  – множитель,

устанавливающий связь между дисперсиями шумов измерения и дисперсиями коэффициентов ДПФ этих шумов,  $\Delta_l$  – шаг дискретизации уравнения (1). Коэффициенты ДПФ  $\hat{K}_{p\alpha}^*(l)$  являются решениями нелинейного уравнения (4) для  $l = 0, \dots, N-1$ . Аналогичную формулу можно привести и для вычисления производной  $\tilde{R}'_w(\gamma)$ . Заметим, что вычисление параметра регуляризации в пространстве коэффициентов ДПФ существенно экономит вычислительные затраты на построение оценки  $\alpha_w$ .

На Рис. 2 кривой 1 показана зависимость относительной ошибки идентификации  $\delta_k(\gamma)$ , значения  $\tilde{R}_w(\gamma)$  показаны кривой 2, штриховыми прямыми 3 – значения  $\vartheta_m(\beta/2)$ ,  $\vartheta_m(1-\beta/2)$ . Те значения  $\gamma$ , для которых значения  $\tilde{R}_w(\gamma)$  находятся между этими двумя прямыми являются значениями  $\gamma_w$  (для них выполняется неравенство (14)). Видно, что эти значения соответствуют области минимальной ошибки идентификации.

Следовательно, предложенный алгоритм выбора параметра регуляризации можно использовать для оценивания оптимального значения параметра регуляризации при высоком уровне шума измерения входного сигнала.

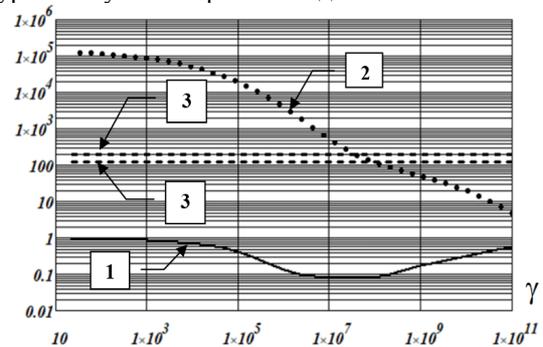


Рис. 2. К выбору параметра регуляризации

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для ответа на вопрос, какой выигрыш по точности идентификации дает изложенный алгоритм выбора параметра регуляризации по сравнению с алгоритмом, который не учитывает шум измерения входного сигнала, был выполнен многочисленный вычислительный эксперимент. Рассмотрим наиболее интересные результаты этих экспериментов.

В качестве импульсной переходной функции использовалась «колебательная» ИПФ, график которой изображен на Рис. 3.

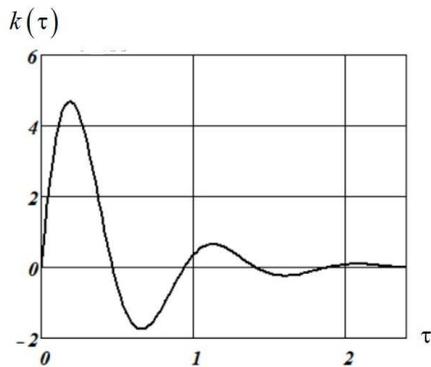


Рис. 3. Импульсная переходная функция  $k(\tau)$

Входной сигнал задавался двумя функциями: «узкополосной» - сплошная кривая на Рис. 4 (обозначим ВХОД1) и «широкополосной» - точечная кривая на Рис. 4 (обозначим ВХОД2). Такой выбор входных сигналов был обусловлен тем, что для широкополосного сигнала обусловленность системы (2) уменьшается и при прочих равных условиях точность оценивания ИПФ возрастает. Количество отсчетов идентифицируемой  $k(\tau_j)$   $N_k = 100$ , количество отсчетов входного сигнала  $\varphi(\tau_j)$   $N_\varphi = 60$ ,  $N_f = N_\varphi + N_k - 1 = 159$  и  $N = 256$ . Шаг дискретизации  $\Delta_t = 0.022$ .

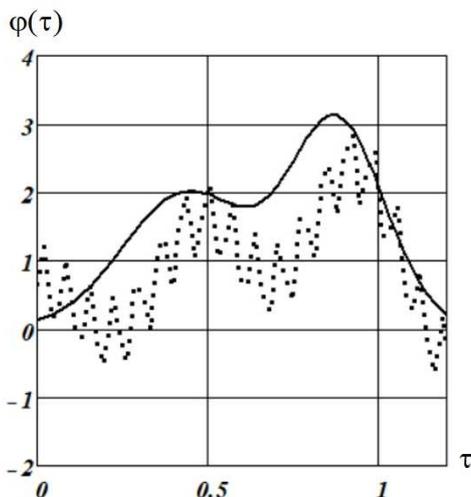


Рис. 3. Входные сигнала системы

Относительные уровни шума правой части  $\delta_f$  и шума измерения входного сигнала  $\delta_\varphi$  определялись соотношениями:  $\delta_f = \frac{\|n\|}{\|f\|}$ ,  $\delta_\varphi = \frac{\|s\|}{\|\varphi\|}$ , где  $f, \varphi$  - векторы размерности  $N_f, N_\varphi$ , составленные из значений  $f(t_i), \varphi(\tau_j)$  соответственно,  $\|\cdot\|$  - евклидова норма вектора.

Для ответа на вопрос, какой выигрыш по точности идентификации дает изложенный

алгоритм выбора параметра регуляризации был введен коэффициент эффективности этого алгоритма выбора, определяемый соотношением:

$$K_{eff} = \frac{\|k_{\bar{\alpha}_w} - \bar{k}^+\|}{\|k_{\alpha_w} - \bar{k}^+\|}, \quad (13)$$

где  $k_{\bar{\alpha}_w}$  - регуляризованное решение, построенное при параметре регуляризации  $\bar{\alpha}_w$ , найденном по критерию оптимальности, но без учета шума измерения входного сигнала (статистика (7)),  $k_{\alpha_w}$  - регуляризованное решение, построенное при параметре регуляризации  $\alpha_w$ , вычисленным предлагаемым алгоритмом выбора (статистика (9)). Если  $K_{eff}$  больше 1, то предпочтительным является выбор параметра регуляризации предлагаемым алгоритмом. Заметим, что коэффициент  $K_{eff}$  является случайной величиной, значение которой меняется от одной реализации шумов измерений к другой. Поэтому в качестве неслучайной характеристики использовалось выборочное среднее  $\bar{K}_{eff}$ , определяемое выражением:

$$\bar{K}_{eff} = \frac{1}{N_{sam}} \sum_{l=1}^{N_{sam}} K_{eff}^{(l)},$$

где  $K_{eff}^{(l)}$  - коэффициент эффективности, вычисленный по  $l$ -ой реализации шумов измерений. Объем выборки в эксперименте  $N_{sam} = 50$ .

В таблице приведены значения  $\bar{K}_{eff}$  для двух входных сигналах и разных  $\delta_\varphi$  (0.02, 0.05, 0.10, 0.15). Относительный уровень шума измерения выходного сигнала  $\delta_f = 0.02$ .

Таблица

Средние значения коэффициента эффективности

$\delta_\varphi$	ВХОД1	ВХОД2
0.02	1.02	0.98
0.05	1.19	1.17
0.10	1.39	1.32
0.15	1.79	1.71

## 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Прежде всего отметим эффект «саморегуляризации», который обуславливается шумами измерений входного сигнала и состоит в следующем. В области малых значений параметра регуляризации ошибки решений при неточно заданном входе (Рис. 1, штриховая кривая) меньше ошибок решений при точном входном сигнале (Рис. 4, сплошная кривая). Величина такого уменьшения пропорциональна уровню шума входного сигнала. Этот эффект можно объяснить тем, что при малых  $\alpha$  случайный шум входного сигнала выполняет

своеобразную регуляризацию – квадраты  $|\tilde{\Phi}_p(l)|^2$  коэффициентов ДПФ зашумленного ядра при больших значений  $l$  превалируют в знаменателе выражения (3) над значениями стабилизатора  $\alpha Q_p(l)$  и это уменьшает ошибку вычисления  $\hat{K}_{p\alpha}(l)$  для этих значений  $l$  и, соответственно, вызывает уменьшение общей ошибки регуляризованного решения.

Анализ данных таблицы показывает, что если уровень шума измерения входного сигнала больше уровня шума измерения выходного сигнала, то предпочтительнее оказывается выбор параметра регуляризации предложенный алгоритмом, построенном на основе критерия оптимальности регуляризирующего алгоритма. При этом, чем больше эта разница, тем больше выигрыш по точности идентификации. Так, для отношения  $\delta_f / \delta_\varphi = 7.5$  точность идентификации увеличивается на 70-80%.

## ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты вычислительного эксперимента показывают, что для схем идентификации ИПФ стационарных динамических объектов, где уровень шума измерения входного сигнала существенно выше уровня шума выходного сигнала следует использовать предлагаемые в данной работе регуляризирующий алгоритм и алгоритм оценивания оптимального параметра регуляризации, характерной чертой которых является учет шума измерения входного сигнала. Эти алгоритмы в качестве вычислительной основы используют ДПФ, что обуславливает их высокую вычислительную эффективность и могут обрабатывать сигналы, содержащие несколько тысяч отсчетов. Алгоритмы могут быть обобщены для решения уравнения Фредгольма первого рода с неточно заданным ядром.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректно поставленных задач. М.: Наука, 1979. – 278 с.
- [2] Тихонов А. Н. и др. Численные методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1990. – 231 с.
- [3] Воскобойников Ю.Е., Преображенский Н.Г., Седельников А.И. Математическая обработка эксперимента в молекулярной газодинамике. – Новосибирск: Наука, 1984. – 238 с.
- [4] Воскобойников Ю.Е., Крысов Д.А. Непараметрическая идентификация динамической системы при неточном входном сигнале. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 4 (22). С. 86–93.

- [5] Воскобойников Ю.Е. Устойчивые алгоритмы решения обратных измерительных задач. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2007. – 184 с.
- [6] Воскобойников Ю.Е., Литасов В.А. Устойчивый алгоритм восстановления изображений при неточно заданной аппаратной функции. Автометрия. 2006. № 6. С. 13–22.
- [7] Lukas M. A. Comparison of parameter choice methods for regularization with discrete noisy data. Inverse Problem. 2000. V. 14, № 2. P. 161–184.
- [8] Urmanov A.M., Gribok A. V., Bozdogan H., Hines J. W., Uhrig R. E. Information complexity-based regularizing parameter selection for solution of ill-posed inverse problems. Inverse problems. 2002. V. 18, № 3.
- [9] Воскобойников Ю. Е. Оценивание оптимального параметра регуляризирующего алгоритма восстановления изображений. Ю.Е. Воскобойников. Автометрия. 1995. № 3. С. 64–72.
- [10] Воскобойников Ю. Е. Численная реализация и сравнение четырех способов выбора параметра регуляризации в устойчивых алгоритмах деконволюции. Научный вестник НГТУ. 2004. № 2 (17). С. 27–44.



**Юрий Евгеньевич Воскобойников**, выпускник кафедры автоматки НГТУ (НЭТИ), доктор физ.-мат. наук, профессор, Заслуженный работник Высшей школы РФ, Соросовский профессор, действительный член МАИ,

РАЕ, МАН ВШ, заведующий кафедрой прикладной математики Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (Сибстрин), профессор кафедры автоматки НГТУ. Автор более 290 публикаций, 6 монографий, посвященных решению некорректных задач интерпретации данных и обработке сигналов и изображений, и большого числа учебников и учебных пособий.

Новосибирск, 530073, просп. К. Маркса, д.20

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



**Данила Алексеевич Крысов**, аспирант кафедры Автоматки Новосибирского государственного технического университета. Автор ряда научных статей. Область научных интересов: вейвлет-фильтрация, идентификация систем. Новосибирск, 530073, просп. К. Маркса, д.20

E-mail: [daniel-patriot@yandex.ru](mailto:daniel-patriot@yandex.ru)

Статья поступила 4 мая 2018 г.

## The Algorithm for Identifying the Impulse Response Function at a High Noise Level of Measuring the Input Signal of the System

Yu.E. Voskoboinikov<sup>1,2</sup>, D. A. Krysov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk State Architectural and Construction University (Sibstrin), Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>FGBOU VO Novosibirsk State Technical University, prosp. Karl Marx, 20, Novosibirsk, Russia

*Abstract*-Volter's integral equation of the first kind with a difference kernel is often used as a model of a stationary dynamical system. For such a model, the nonparametric identification problem consists in estimating this difference kernel (called the impulse response function) from the measured values of the input and output signals of the dynamical system being identified. As you know, this problem is ill-posed problem, i.e. the solution may not exist, be uniqueness and be unstable with respect to the errors (measurement noise) of the original data. To obtain a unique stable (but approximate) solution, various methods of regularization are used, in particular, the regularization method A.N. Tikhonov. In this case (with respect to the identification problem), it is assumed that the input signal (the kernel of the integral equation) is specified exactly, and the output signal of the system is registered with some random error. However, this assumption is rarely satisfied in practice, as the input and output signals of the system are measured with random measurement noise. Not taking into account the noise of measuring the input signal of the identified system leads to an increase in the identification error in comparison with the optimal (i.e., the minimum possible identification error). In this paper, we propose a stable identification algorithm in which the noise of the measurement of the input signal (as well as the noise of the measurement of the output signal) is taken into account both in the construction of the regularized solution itself and in the choice of the regularization parameter. This parameter significantly affects the accuracy of the resulting regularized solutions. Therefore, a statistical algorithm for choice the regularization parameter is constructed, which takes into account the dispersion of the noise in the measurement of the input signal and allows us to estimate with an acceptable accuracy the optimal value of the regularization parameter. The performed computational experiment showed a higher accuracy of the proposed identification algorithm in comparison with the regularizing algorithms, which do not take into account the noise of the measurement of the input signal.

*Keywords*: nonparametric identification problem, Volterra integral equation of the first kind, ill-posed problems, the identification regularizing algorithm, regularization parameter, errors of the regularized solution of the identification problem, estimation of the optimal regularization parameter, efficiency of the proposed identification algorithm

### REFERENCES

- [1] Tikhonov A.N., Arsenin V.YA. *Metody resheniya nekorrektno postavlennykh zadach*. M.: Nauka, 1979. – 278 s.
- [2] Tikhonov A. N. i dr. *Chislennyye metody resheniya nekorrektnykh zadach*. M.: Nauka, 1990. – 231 s.
- [3] Voskoboynikov YU.Ye., Preobrazhenskiy N.G., Sedel'nikov A.I. *Matematicheskaya obrabotka eksperimenta v molekulyarnoy gazodinamike*. – Novosibirsk: Nauka, 1984. – 238 s.
- [4] Voskoboynikov YU.Ye., Krysov D.A. *Neparametricheskaya identifikatsiya dinami-cheskoy sistemy pri netochnom vkhodnom signale*. *Avtomatika i programmaya inzheneriya*. 2017. № 4 (22). S. 86–93.
- [5] Voskoboynikov YU.Ye. *Ustoychivyye algoritmy resheniya obratnykh izmeritel'nykh zadach*. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2007. – 184 s.
- [6] Voskoboynikov YU.Ye., Litasov V.A. *Ustoychivyye algoritmy vosstanovleniya izobrazheniy pri netochno zadannoy apparatnoy funktsii*. *Avtometriya*. 2006. № 6. S. 13–22.
- [7] Lukas M. A. Comparison of parameter choice methods for regularization with discrete noisy data. *Inverse Problem*. 2000. V. 14, № 2. P. 161–184.
- [8] Urmanov A.M., Gribok A. V., Bozdogan H., Hines J. W., Uhrid R. E. Information complexity-based regularizing parameter selection for solution of ill-posed inverse problems. *Inverse problems*. 2002. V. 18, № 3.
- [9] Voskoboynikov YU. Ye. *Otsenivaniye optimal'nogo parametra regulyariziruyushchego algoritma vosstanovleniya izobrazheniy*. YU.Ye. Vosko-boy-nikov. *Avtometriya*. 1995. № 3. S. 64–72.
- [10] Voskoboynikov YU. Ye. *Chislennaya realizatsiya i sravneniye chetyrekh sposobov vybora parametra regulyarizatsii v ustoychivyykh algoritmakh dekonvolutsii*. *Nauchnyy vestnik NGTU*. 2004. № 2 (17). S. 27–44.



**Yury Evgenievich Voskoboinikov**, doctor of physical and mathematical sciences. in Economics, Professor, Honored Worker of the Higher School of Russia, Soros Professor, Full Member of the MAI, RAE, MAN VS, Professor, Automation Department, NSTU.

Head of the Department of Applied Mathematics of the Novosibirsk State Architectural and Construction University (Sibstrin). He is the author of more than 300 scientific publications, 6 monographs devoted to solving ill-posed problems of data interpretation and signal and image processing, 16 textbooks and teaching aids.

Novosibirsk, prosp. K. Marx, 20

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



Danila Alekseevich Krysov, postgraduate student of Automation Department of Novosibirsk State Technical University. Author of several scientific articles. Research interests: wavelet filtration, identification of systems. Novosibirsk, prosp. K. Marx, 20  
**E-mail:** [daniel-patriot@yandex.ru](mailto:daniel-patriot@yandex.ru)

The paper was received on May 4, 2018.

## **V. Информационные технологии.**

### **Содержание раздела:**

- ◇ Е. А. Басыня, С. В. Казарбин. Разработка системы мониторинга работы пользователей ПК для оптимизации бизнес-процессов предприятия. Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий, Новосибирск, Российская Федерация. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 77–82.
- ◇ Е. А. Басыня, А.А. Юшманов. Разработка межсетевое ретранслятора. Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий, Новосибирск, Россия. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 83–89.

# Разработка системы мониторинга работы пользователей ПК для оптимизации бизнес-процессов предприятия

Е. А. Басыня<sup>1,2</sup>, С. В. Казарбин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

*Аннотация:* В данной статье представлен один из возможных подходов к оптимизации бизнес-процессов предприятия посредством мониторинга работы пользователей персональных компьютеров. Отмечается важность мониторинга работы сотрудников как инструмента управления деятельностью предприятия. Описывается методология проведения сравнительного анализа существующих решений. Излагается проблематика предметной области, включающая указания наиболее критичных недостатков и существенных уязвимостей в области обеспечения информационной безопасности пользовательских данных. Отражается сложность аудита программного обеспечения, распространяемого с закрытым исходным кодом, который не может быть качественно проведен в рентабельные сроки без предоставления кода. Декларируется один из возможных способов выявления скрытых функций ряда программных решений (нарушающих конфиденциальность пользовательских данных) посредством инструментов активного и пассивного анализа объекта в изолированной среде: снифферов, анализаторов, фреймворков пентестинга, песочниц и контейнеров. В работе также изложены требования, предъявляемые к функциональным возможностям и обеспечению информационной безопасности пользовательских данных предлагаемого решения. Освещена разработка свободно распространяемого программного продукта с открытым исходным кодом для учета рабочего времени сотрудников предприятия. Активность пользователей определяется по использованию мыши и клавиатуры. Регистрируется информация о времени работы с отдельным окном приложения или вкладкой браузера и время активности в целом. В статье приводятся графические иллюстрации, демонстрирующие результат работы разработанного решения. Разработанный программный продукт представляет собой приложение для операционных систем семейства *Windows*. Характеристики и преимущества полученного решения включают обеспечение информационной безопасности пользовательских данных, запись журнала событий, предоставление отчетов об активности пользователя, графическую аналитику, корректную работу с протоколами удаленного сетевого доступа, портативность и другие функции. Излагаются дальнейшие запланированные работы над реализованной системой.

*Ключевые слова:* мониторинг работы пользователей, учет активности и бездействия, удаленная работа.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день мониторинг работы сотрудников является важным инструментом оптимизации бизнес-процессов предприятия. Контрольно-пропускные пункты, таблицы и журналы далеко не всегда объективно отражают деятельность специалистов. Учет фактической деятельности и времени активности работы за персональным компьютером может использоваться как важный вспомогательный инструмент управления деятельностью компании [1–5].

В настоящее время на рынке представлено множество решений, выполняющих данную задачу. В ходе сравнительного анализа существующих решений с применением виртуализации среды приложений («песочниц») технологий активного и пассивного анализа трафика и информационных систем (снифферов, сканеров, зондеров) было выявлено ряд существенных проблем [6–8]:

- 1) хранение данных на локальной стороне в незашифрованном или некриптоустойчивом виде. Например, с использованием алгоритма *DES* (англ. *Data Encryption Standard*);
- 2) незадекларированная отправка информации на сервер разработчика в скрытом режиме;
- 3) незадекларированное превышение привилегий программного обеспечения, получающего доступ к камере, микрофону и другому оборудованию;
- 4) использование уязвимого стека технологий при разработке (например, *Adobe Air*);
- 5) использование сетевых протоколов и технологий, в которых нет функциональной необходимости. Например, установка зашифрованного виртуального канала связи с подозрительными *IP* адресами;
- 6) распространение с закрытым исходным кодом. Приведенные недостатки могут быть следствием ошибок команды разработчиков или умышленно интегрированными инструментами скрытого

управления компьютером со сбором конфиденциальной информации.

Несмотря на закрытый исходный код, использование средств перехвата и анализа сетевого трафика позволяет обнаружить достаточно заметную сетевую активность [9, 10], даже в том случае, когда передача данных не предполагается настройками и не отражена ни в документации, ни в пользовательском соглашении. Запуск продукта в песочнице позволяет отследить неправомерный доступ к различным системным файлам, веткам реестра и оборудованию. Что позволяет обоснованно заподозрить такое программное обеспечение в сборе, анализе и передаче конфиденциальных данных на сервер правообладателя.

Помимо указанных существующих недостатков с точки зрения информационной безопасности, различные предлагаемые на рынке решения также отличаются рядом функциональных проблем. Большинство продуктов формируют недостаточно информативные отчеты, а журналы событий представляются в трудно анализируемой форме из-за большого и часто излишнего количества записей. Отдельные продукты не поддерживают или некорректно учитывают удаленную работу пользователей через терминальные подключения и протоколы удаленного сетевого доступа в целом. Ни один продукт не поддерживает интеграцию с межсетевым экраном, что не позволяет системному администратору и топ менеджерам получать исчерпывающую информацию о деятельности пользователей. Помимо этого, межсетевому экрану и системе обнаружения и предотвращения вторжений не предоставляются полнофункциональные агенты сбора информации.

Важно также отметить, что наиболее востребованные из существующих сегодня решений для учета рабочего времени отличаются дорогостоящей политикой лицензирования.

## I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В рамках данной работы ставилась задача разработки бесплатного программного продукта учета времени работы сотрудников за персональным компьютером под управлением операционной системы Windows, распространяемого с открытым исходным кодом, устраняющим выявленные уязвимости конкурентов и

обладающего следующими функциональными возможностями:

- 1) обеспечение информационной безопасности пользовательских данных с использованием симметричного алгоритма блочного шифрования AES с длиной ключа 256 бит;
- 2) отсутствие инструментов скрытого сбора информации и управления компьютером;
- 3) формирование информативных отчетов с графиками;
- 4) корректная обработка журналов событий Windows;
- 5) корректная работа с протоколами и технологиями удаленного сетевого доступа;
- 6) верификация безопасности соединения (например, *HTTP* (англ. *HyperText Transfer Protocol* – протокол передачи гипертекста) и *HTTPS* (англ. *HyperText Transfer Protocol Secure* – безопасный протокол передачи гипертекста);
- 7) портативность программного продукта;
- 8) работа в скрытом режиме для пользователя с открытием программы только по заданному сочетанию клавиш и вводом пароля;
- 9) дальнейшая интеграция модуля взаимодействия с сетевым шлюзом / межсетевым экраном, разрабатываемым Научно-исследовательским институтом информационно-коммуникационных технологий [5].

## II. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО РЕШЕНИЯ

Разработка инструмента учета времени работы сотрудников за персональным компьютером велась с учетом выявленной проблематики данной области [11–14]. Разработанное решение определяет время работы в целом и рассчитывает как срок работы с окном определенной программы, так и время бездействия. Активность пользователя определяется произвольным использованием мыши или клавиатуры. Если в течение достаточно длительного периода времени (по умолчанию – более 60 с) пользователь не совершал никаких действий, этот период считается бездействием. Все остальное время в течение работы установленного решения определяется как активность пользователя.

Сохраняется информация о системном процессе, который владеет определенным окном Windows, его описание и заголовок окна (Рис. 1).

Имя процесса	Описание процесса	Окно процесса	Время работы:	Время бездействия
devenv	Microsoft Visual Studio 2017	-	04:04:54	01:01:34
notepad++	Notepad++ : a free (GNU) source code editor	-	00:03:33	00:00:00
mintty	MSYS2 terminal	-	00:07:09	00:00:00
explorer	Проводник	-	00:09:54	01:16:34
chrome	Google Chrome	-	01:51:38	00:27:15
WINWORD	Microsoft Word	-	00:29:37	00:00:00
KeePass	KeePass	-	00:00:30	00:00:00
Mattemost	Mattemost	-	00:04:07	00:00:00
ИТОГО:			06:51:26	02:45:24

Рис. 1. Графическое окно программы

В случае работы с интернет-браузером фиксируется время работы с каждой вкладкой и используемый протокол. При разработке для поддержки был выбран ряд наиболее популярных браузеров, заголовков окна каждого из которых содержит информацию о заголовке активной веб-страницы, что позволяет получить представление о содержании посещаемых пользователями страниц (Рис. 2).

Существует возможность сформировать отчет об активности за некоторый период и экспортировать его из программы. Программа работает в скрытом для пользователя режиме. Чтобы открыть основное окно программы, необходимо использовать секретную комбинацию клавиш и ввести пароль. Пароль позже может быть изменен в настройках (Рис. 3)

Имя процесса	Описание процесса	Окно процесса	Время работы	Время бездействия
TM.GUI	TM.GUI	-	00:02:44	00:00:00
explorer	Проводник	-	00:00:01	00:00:00
chrome	Google Chrome	-	00:00:25	00:00:00
firefox	Firefox	-	00:00:30	00:00:00
firefox	Tor Browser	-	00:00:11	00:00:00
firefox	Tor Browser	HTTP НГТУ. Новосибирский государст...	00:00:02	00:00:00
firefox	Tor Browser	HTTPS Google - Tor Browser	00:00:01	00:00:00
firefox	Tor Browser	HTTPS Яндекс - Tor Browser	00:00:01	00:00:00
firefox	Tor Browser	HTTPS Welcome!   VK - Tor Browser	00:00:01	00:00:00
firefox	Tor Browser	HTTPS Mail.Ru: почта, поиск в интернет...	00:00:05	00:00:00
ИТОГО:			00:03:53	00:00:00

Рис. 2. Графическое окно программы

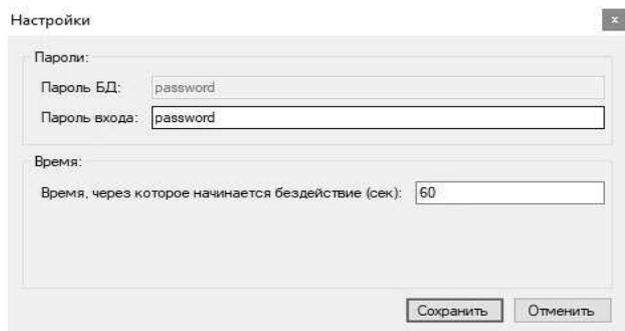


Рис. 3. Окно настроек

Информация об активности и бездействии за выбранный период представлена в графическом окне программы в виде перечня программ и вкладок браузера, с которыми работал пользователь, затраченного времени, указанного в виде активности и бездействия. Данные также представляются в графическом виде для последующего анализа (Рис. 4).

Конфигурация и сохраняемые данные хранятся в зашифрованном виде. Для шифрования используется симметричный алгоритм блочного шифрования AES (англ. *Advanced Encryption Standard*) с длиной ключа 256 бит. Этот алгоритм в настоящее время считается достаточно сильным и обладает приемлемой скоростью выполнения. Шифрование позволяет оставаться уверенным в неизменной оригинальности данных и отсутствии их модификации сторонними средствами. Пароль, на основе которого вырабатываются ключи шифрования, задается во время первого запуска программы.

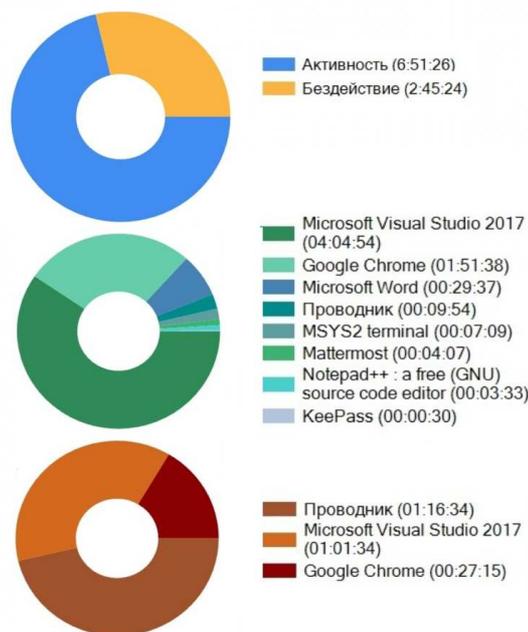


Рис. 4. Пример графической аналитики

Для корректного учета удаленной работы производится запись о создании и прерывании сессий по протоколу RDP (англ. *Remote Desktop Protocol*, протокол удалённого рабочего стола).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы был разработан бесплатный программный продукт учета времени работы сотрудников за персональным компьютером под управлением операционной системы Windows, распространяемый с открытым исходным кодом [15].

Выполнены следующие поставленные задачи:

- 1) обеспечена информационная безопасность пользовательских данных с использованием симметричного алгоритма блочного шифрования AES с длиной ключа 256 бит;
- 2) отсутствуют инструменты скрытого сбора информации и управления компьютером;
- 3) реализованы информативные отчеты с графиками;
- 4) отлажена корректная обработка журналов событий Windows;
- 5) отлажена корректная работа с протоколами и технологиями удаленного сетевого доступа;
- 6) верифицируется безопасность соединения (http и https);
- 7) реализована работа в скрытом режиме для пользователя с открытием программы только по заданному сочетанию клавиш и вводом пароля;
- 8) ведется работа над дальнейшей интеграцией модуля взаимодействия с сетевым шлюзом / межсетевым экраном [6, 7], разрабатываемым Научно-исследовательским институтом информационно-коммуникационных технологий;
- 9) ведется работа над противодействием вредоносным скриптам и программному обеспечению, позволяющему фальсифицировать деятельность пользователя.

Преимуществом разработанного решения является портативность – не требуется установка. Используется встраиваемая система управления базами данных, для работы программы достаточно установленной платформы .NETFramework версии 4 или более позднего выпуска. Необходимая версия платформы установлена в операционной системе Windows 8 и более поздних выпусках и может быть установлена в более ранних версиях операционных систем семейства Windows.

Решение было реализовано в полном объеме, надлежащем качестве и успешно апробировано более чем в 50 предприятий с численностью сотрудников более 70 человек. На текущий момент идут работы по интеграции модуля взаимодействия с сетевым шлюзом, разрабатываемым Научно-исследовательским институтом информационно-коммуникационных технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Резниченко Д.А. Автоматизация процесса учета рабочего времени сотрудников // Экономика и менеджмент инновационных технологий. 2016. № 6 [Электронный ресурс]. URL: <http://ekonomika.snauka.ru/2016/06/11853>.
- [2] Матусовский Ю.С. Информационная система мониторинга рабочего времени сотрудников высших учебных заведений. Новое в науке и образовании: сб. тр. ежегод. междунар. науч.-практ. конф., Москва, 13 апр. 2016 г. Москва, 2016. С. 88-94.
- [3] Кутафьева Л.В. Анализ использования рабочего времени // Молодой ученый. - 2013. - №3. - С. 242-244.
- [4] Свешникова О.Н., Кузнецов М.Е. Отечественные автоматизированные программы учета рабочего времени

в системе мотивации персонала. Успехи современной науки и образования. 2017. Т.3. №2. С.28–33.

- [5] Буян С.Д. Мониторинг сетевой активности автоматизированных рабочих мест сотрудников организации. Безопасность информационных технологий. - 2018. Т 25. №2. С. 71–79.
- [6] Басыня Е. А., Казарбин С. В. Защита от фальсификации информационных ресурсов. Перспективное развитие науки, техники и технологий: сб. тр. 6 междунар. науч.-практ. конф., Курск, 20-21 окт. 2016 г. С. 16–19.
- [7] Басыня Е.А. Сафронов А.В. Разработка и исследование системы управления метаданными исследований. Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2016) = Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE–2016): тр. 13 междунар. науч.-техн. конф., Новосибирск, 3–6 окт. 2016 г.: в 12 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. Т. 9. С. 155-157. ISBN 978-5-7782-2991-4.
- [8] Басыня Е.А., Французова Г.А., Гунько А.В. О шифровании и анонимизации в вопросах обеспечения информационной безопасности. Компьютерные технологии в науке, производстве, социальных и экономических процессах: материалы 14 междунар. науч.-практ. конф., Новочеркасск, 12 дек. 2013 г. Новочеркасск: ЮРГПУ(НПИ), 2014. С. 165–168.
- [9] Basyня E.A., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. Methods of self-organization in providing network security. Global Science and Innovation: materials of the 1 intern. sci. conf., USA, Chicago, 17–18 Dec. 2013. Chicago: Accent Graphics communications 2013. Vol. 2. P. 386–389.
- [10] Французова Г.А. Гунько А.В., Басыня Е.А. Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети: метод противодействия сетевым угрозам. Программная инженерия. 2014. № 3. С. 16–20.
- [11] Журкина Т.А. Межеричкая Н.Н., Насонова С.А. Учет и анализ рабочего времени. Научный альманах. 2016. № 7-1 (21). С. 69–74.
- [12] Наумко И.А., Сухорукова Н.Ф. Выбор системы учета рабочего времени для внештатных сотрудников организации. Автоматизация и управление в технических системах. 2017. № 1 URL: <http://auts.esrae.ru/pdf/2017/1/454.doc>.
- [13] Кариюкин А.В. Программное решение проблемы прогулов и опозданий на работу. Cloud of Science. 2014. Т. 1. № 3. С. 472–478.
- [14] Gupta J. Improving Workers' Productivity and Reducing Internet Abuse. Journal of Computer Information Systems. 2004. Vol. 44, I. 2. P. 74–78.
- [15] Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий. 2016. URL: <https://nii-ikt.ru/>.



**Евгений Александрович Басыня** защитил кандидатскую диссертацию в 2015 году. Продолжил педагогическую и научную деятельность в Новосибирском государственном техническом университете в должности доцента кафедры Автоматики. В 2016 году при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере открыл Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий.

г. Новосибирск, ул. Депутатская,  
д. 48

**E-mail:** [director@nii-ikt.ru](mailto:director@nii-ikt.ru)

**Сергей Владимирович Казарбин** занимается научной деятельностью и программными разработками под руководством Басыни Е.А. начиная с бакалавриата и магистратуры Новосибирского государственного технического университета. Золотой призер межвузовской олимпиады "Network Security & Technologies - 2017", проводимой компанией D-Link, Научно-исследовательским институтом информационно-коммуникационных технологий и Сибирским государственным университетом геосистем и технологий



в 2017 году.

г. Новосибирск, ул. Депутатская,  
д. 48

**E-mail:** [kazarbin@nii-ikt.ru](mailto:kazarbin@nii-ikt.ru)

Статья поступила в редакцию 15 мая 2018 г.

## Development of Software for Monitoring the Activity of Users of Personal Computers to Optimize the Business Processes of an Enterprise

E. A. Basinya<sup>1,2</sup>, S. V. Kazarbin<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Research Institute of Information and Communication Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**Abstract:** This paper presents one of the possible approaches to the optimization of business processes of the enterprise by monitoring the activity of users of personal computers. The importance of monitoring the work of employees as a tool for managing the activities of the enterprise is noted. The methodology of comparative analysis of existing solutions is described. The problems of such solutions, including the indication of the most critical shortcomings, are presented. The main disadvantages of such solutions in the field of information security of user data are listed. Distributed with closed source solutions can not be considered in sufficient detail, in some cases it is known that the developers of such solutions have taken insufficient measures to ensure the preservation of confidentiality, integrity and relevance of user data. The missing functionality in such solutions is listed. When defining a task, the requirements for the functionality and security of user data are presented. The requirements for the solution being developed are indicated taking into account the identified shortcomings of existing solutions. The development of a free software product with an open source code for recording employees' working hours is described. User activity is determined by the use of the mouse and keyboard. Information about the time of work with a separate application window or tab of the browser and the time of activity in general are recorded. The article provides graphic illustrations demonstrating the result of the developed solution. The developed software product is an application for operating systems of the Windows family. Features and benefits of the solution include ensuring the information security of user data, recording event logs, providing reports on activity and graphical analytics, working with remote access protocols, portability and some others. Further work on the implemented solution is considered.

**Keywords:** user activity monitoring, idle time and active time monitoring, remote work.

### REFERENCES

- [1] Reznichenko D.A. Avtomatizatsiya protsessa ucheta rabocheho vremeni sotrudnikov // Ekonomika i menedzhment innovatsionnykh tekhnologiy. 2016. № 6 [Elektronnyy resurs]. URL: <http://ekonomika.snauka.ru/2016/06/11853>.
- [2] Matusovskiy YU.S. Informatsionnaya sistema monitoringa rabocheho vremeni sotrudnikov vysshikh uchebnykh zavedeniy. Novoye v nauke i obrazovanii: sb. tr. yezhegod. mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Moskva, 13 apr. 2016 g. Moskva, 2016. S. 88-94.
- [3] Kutaf'yeva L.V. Analiz ispol'zovaniya rabocheho vremeni // Molodoy uchenyy. - 2013. - №3. - S. 242-244.
- [4] Sveshnikova O.N., Kuznetsov M.Ye. Otechestvennyye avtomatizirovannyye programmy ucheta rabocheho vremeni v sisteme motivatsii personala. Uspekhi sovremennoy nauki i obrazovaniya. 2017. T.3. №2. S.28-33.
- [5] Buyan S.D. Monitoring setevykh protsessov avtomatizirovannykh rabochikh mest sotrudnikov. Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologiy. - 2018. T 25. №2. S. 71-79.
- [6] Basinya Ye. A., Kazarbin S. V. Zashchita ot fal'sifikatsii informatsionnykh resursov. Perspektivnoye razvitiye nauki, tekhniki i tekhnologiy: sb. tr. 6 mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Kursk, 20-21 okt. 2016 g. S. 16-19.
- [7] Basinya Ye.A. Safronov A.V. Razrabotka i issledovaniye sistemy upravleniya metadannymi izobrazheniya. Aktual'nyye problemy elektronnoy priborostroyeniya (APEP-2016) = Aktual'nyye problemy elektronnoy priborostroyeniya (APEIE-2016): tr. 13 mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.,

- Novosibirsk, 3-6 okt. 2016 g. : v 12 t. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2016. T. 9. S. 155-157. ISBN 978-5-7782-2991-4.
- [8] Basynya Ye.A., Frantsuzova G.A., Gun'ko A.V. O shifrovanii i anonimizatsii v voprosakh obespecheniya informatsionnoy bezopasnosti. Komp'yuternyye tekhnologii v nauke, proizvodstve, sotsial'nykh i ekonomicheskikh protsessakh: materialy 14 mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Novocherkassk, 12 dek. 2013 g. Novocherkassk: YURGPU (NPI), 2014. S. 165-168.
- [9] Basynya Ye.A., Frantsuzova G.A., Gunko A.V. Metody samoorganizatsii v obespechenii setevoy bezopasnosti. Global'naya nauka i innovatsii: materialy 1 stazhera. Sci. konf., SSHA, Chikago, 17-18 dekabrya 2013 goda. Chicago: Accent Graphics communications 2013. Vol. 2. S. 386-389.
- [10] Frantsuzova G.A. Gun'ko A.V., Basynya Ye.A. Samoorganizuyushchayasya sistema upravleniya trafikom vychislitel'noy seti: metod protivodeystviya setevym ugrozam. Programmnaya inzheneriya. 2014. № 3. S. 16-20.
- [11] Zhurkina T.A. Mezheritskaya N.N., Nasonova S.A. Uchet i analiz rabocheho vremeni. Nauchnyy al'manakh. 2016. № 7-1 (21). S. 69-74.
- [12] Naumko I.A., Sukhorukova N.F. Vybory sistemy ucheta rabocheho vremeni dlya vneshtatnykh sotrudnikov organizatsiy. Avtomatizatsiya i upravleniye v tekhnicheskikh sistemakh. 2017. № 1 URL: <http://auts.esrae.ru/pdf/2017/1/454.doc>.
- [13] Karyukin A.V. Programmnoye resheniye problemy progulov i opozdaniy na rabotu. Oblako nauki. 2014. T. 1. № 3. S. 472-478.
- [14] Gupta Dzh. Povysheniye proizvoditel'nosti truda rabotnikov i sokrashcheniye zloupotrebleniya v Internete. Zhurnal komp'yuternykh informatsionnykh sistem. 2004. Vol. 44, I. 2. P. 74-78.
- [15] Nauchno-issledovatel'skiy institut informatsionno-kommunikatsionnykh tekhnologiy. 2016. URL: <https://nii-ikt.ru/>.



**Evgeny Alexandrovich Basinya** defended his PhD thesis in 2015. He continued his teaching and research activities as an associate professor at the automation department in the Novosibirsk State Technical University. In 2016, he set up the Research Institute of Information and Communications Technologies with the support of the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology and is now its director.

Novosibirsk, Str. Deputatskaya, H. 48

E-mail: [director@nii-ikt.ru](mailto:director@nii-ikt.ru)



**Sergei Vladimirovich Kazarbin** is engaged in scientific activities and software development under the leadership of E.A. Basinya, starting with the bachelor's and master's degrees of the Novosibirsk State Technical University. The Gold medal winner of the Interuniversity Olympiad "Network Security & Technologies - 2017", conducted by D-Link, the Research Institute of Information and Communication Technologies and the Siberian State University of Geosystems and Technologies in 2017.

Novosibirsk, Str. Deputatskaya, H. 48

E-mail: [kazarbin@nii-ikt.ru](mailto:kazarbin@nii-ikt.ru)

The paper was received on May 15, 2018.

# Разработка межсетевого ретранслятора

Е. А. Басыня<sup>1,2</sup>, А.А. Юшманов<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий, Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Российская Федерация

**Аннотация:** В данной статье описан процесс реализации программной части межсетевого ретранслятора на базе одноплатного компьютера *Raspberry Pi 3 model B*, который был выбран в качестве аппаратного модуля для устройства. Также был проведен сравнительный анализ существующих решений, таких, как VPN-сервисы, VPN-роутеры, *Anonabox*, *Onion Pi*. В результате разбора аналогов было выявлено, что ни один из них не предоставляет возможности выбора пользователем сети для ретрансляции информационных потоков. Существующие решения предлагают варианты ретрансляции трафика либо только через VPN-сервера, либо только через сеть *Tor*. Устройство, реализованное в данной работе, позволяет ретранслировать трафик в различные сети по желанию пользователя. В качестве сетей для ретрансляции трафика используются оверлейные сети *Tor* (сокр. от англ. *The Onion Router*, «Луковый маршрутизатор») и *I2P* (сокр. от англ. *Invisible Internet Project*, Проект «Невидимый интернет»), работающие поверх стека протоколов *TCP/IP* в глобальной сети *Internet*. Обеспечение защиты процесса передачи данных достигается многослойным шифрованием «луковой» и «чесночной» маршрутизации. В будущем планируется добавить и другие оверлейные технологии, такие, как *RetroShape* и *Freenet*, что приведет к расширению функциональности предлагаемого решения. В ходе работы к *GPIO* (сокр. от англ. *General-Purpose Input/Output*, «Интерфейс ввода/вывода общего назначения») аппаратного модуля был подключен ключ на нормально разомкнутых контактах, который управляет программой, написанной для переключения между сетями ретрансляции трафика. Таким подходом обеспечивается более комфортное взаимодействие между пользователем и межсетевым ретранслятором. В работе описаны планируемые улучшения межсетевого ретранслятора для увеличения универсальности устройства (достигаемые путем изменения конфигураций сетевых интерфейсов аппаратного модуля) и для обхода нежелательных блокировок трафика в сетях, не являющихся доверенными. Реализованное решение предназначено для обеспечения защиты процесса передачи данных в вычислительных сетях, не являющихся доверенными.

**Ключевые слова:** оверлейные технологии, оверлейные сети, *Tor*, *I2P*, VPN-сервис, VPN-провайдер, *Wi-Fi*

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день повсеместное распространение получили бесплатные *Wi-Fi* точки, предоставляющие доступ в глобальную сеть *Internet*. Их можно найти практически везде: в административных учреждениях, кафе, ресторанах, в метро и даже в парках.

Однако, следует отметить, что стандартами *Wi-Fi* не предусмотрено обязательное шифрование данных в открытых сетях. Это говорит о том, что все данные, которые передаются по незащищенному беспроводному соединению, потенциально могут быть перехвачены и проанализированы злоумышленниками. К таким данным могут относиться пары логин/пароль, номера банковских счетов, пластиковых карт или личная переписка. Поэтому, при использовании общедоступных точек доступа не следует передавать в Интернет незащищенные данные.

При подключении к открытой *Wi-Fi* точке доступа человек не может быть уверен, что в случае действий злоумышленника, передаваемая им информация не будет скомпрометирована только из-

за отсутствия шифрования внутри сети. Доверенное лицо провайдера имеет возможность прослушивать большую часть отправленного трафика, что может послужить возможностью для «инсайдерских» (внутренних) атак. Таким образом, данные пользователя могут быть перехвачены самыми разными способами. Чтобы это предотвратить, решено было разработать устройство, способное обеспечить защищенную передачу данных пользователем.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы являлась разработка межсетевого портативного ретранслятора, обеспечивающего защиту процесса передачи данных в вычислительных сетях, не являющихся доверенными.

Стоит отметить, что конфиденциальность информации можно реализовать различными способами. Одним из возможных решений является использование оверлейных технологий, а именно оверлейных сетей *Tor* и *I2P* в совокупности с технологиями виртуальных защищенных каналов связи [1-8].

Оверлейная сеть – логическая сеть, работающая поверх другой сети, *Tor* и *I2P* работают поверх *Internet*. Трафик в данных оверлейных сетях маршрутизируется через цепочки, представляющие собой маршрут, проходящий через несколько хостов в сети, это значит, что отправленная информация, прежде чем дойти до пункта назначения, пройдет через несколько хостов сети, называемых «узлами». Например, в сети *Tor*, цепочка состоит из трех узлов: входного (англ. *Guard Relay*), промежуточного (англ. *Middle Relay*) и выходного (англ. *Exit Relay*). При помощи «луковой» маршрутизации, используемой в *Tor*, маршрут трафика будет пролегать через эти три узла, сначала входной, затем промежуточный и последний через выходной, откуда он будет направлен к месту назначения. Так как узлом сети может управлять любой человек, в основе оверлейных сетей лежит предположение о том, что каждый узел может управляться злоумышленником. В оверлейных сетях трафик шифруется многослойно («чесночная» и «луковая» маршрутизация используют именно такое шифрование), что обеспечивает безопасность передаваемых данных, проходящих через несколько узлов сети. По этой причине, сети *Tor* и *I2P* были использованы в работе.

Следует отметить, что у данных сетей существуют недостатки. Например, известно, что *I2P* крайне уязвима к так называемым *timing*-атакам или атакам по времени, также, как и *Tor* [9-12]. Но эти уязвимости крайне трудно реализуемы на практике и требуют много ресурсов.

При взаимодействии с межсетевым ретранслятором пользователь должен иметь возможность свободно перемещать устройство между открытыми *Wi-Fi* точками доступа. Также пользователь должен иметь возможность подключиться к межсетевому ретранслятору с разных устройств, будь то смартфоны (мобильные устройства, работающие под управлением Операционных Систем (ОС) *OSi*, *Android*, *Windows Mobile*, *Tizen* и т.д.), ноутбуки или стационарные компьютеры. Само устройство не должно потреблять большое количество электроэнергии для поддержания работы, т.к. есть потенциальная необходимость длительного поддержания функционирования устройства (до нескольких недель, месяцев) и обеспечивать конфиденциальность пользователя и его трафика, используя многослойное шифрование оверлейных сетей *Tor* и *I2P*.

Практическая значимость работы состоит в том, что результаты данной работы могут использоваться людьми, желающими обеспечить конфиденциальность собственного сетевого взаимодействия. Устройство межсетевое ретранслятора использует несколько оверлейных технологий для своей работы. Таким образом трафик пользователя может переводиться как в сеть *Tor*, так и в *I2P*. При желании количество вариантов

оверлейных сетей, через которые переводится трафик можно увеличить. Например, переводить трафик через другие сети (такие, как *Freenet* или *RetroShare*).

Одно из отличий от существующих аналогов в том, что пользователь может выбирать желаемую оверлейную сеть, куда будет ретранслироваться трафик, будь то *Tor*, *I2P*, *VPN*-провайдер (сокр. от англ. *Virtual Private Network*, «Виртуальные частные сети») или свой *VPN*-сервер. Другое существенное отличие от аналогов - цена. Существующие рентабельные аналоги, такие как *Onion Pi*, *Anonabox Pro* стоят как минимум в два раза дороже устройства, описанного в данной работе и позволяют ретранслировать трафик лишь в одну сеть, не давая выбора. То же самое касается и *VPN*-сервисов с *VPN*-роутерами. При этом *Anonabox Pro* не может обеспечить стабильной работы для пользователя (85-90% трафика при использовании режима *VPN* вместе с *Tor* теряется) [13]. Другим аналогом межсетевого ретранслятора являются *VPN*-роутеры, цена которых в среднем как минимум в 5 раз дороже, в зависимости от модели роутера.

## II. РАЗРАБОТКА И РЕАЛИЗАЦИЯ МЕЖСЕТЕВОГО РЕТРАНСЛЯТОРА

Аппаратный модуль межсетевого ретранслятора должен быть портативным, универсальным, чтобы к нему было возможно подключаться со смартфона, ноутбука или стационарного компьютера. Другим немаловажным требованием является малое потребление электроэнергии в сравнении с аналогами. Также устройство должно иметь встроенный *Wi-Fi*-адаптер, больше двух *USB*-разъемов (сокр. от англ. *Universal Serial Bus* — «Универсальная последовательная шина»), набор базовых портов ввода-вывода *GPIO*, *Ethernet*-разъем.

Учитывая требования, наиболее рентабельным вариантом является одноплатный компьютер. В зависимости от модели характеристики разнятся, но одноплатные компьютеры портативны, потребляют малое количество электроэнергии, поддерживают автономную работу вне электросети, используя портативный аккумулятор для питания, и способны обеспечить конфиденциальность пользователя при правильной настройке.

Среди множества моделей одноплатных компьютеров для данной работы был выбран *Raspberry Pi 3 model B*. Обладая 64-битным четырехъядерным процессором с пиковой частотой 1.2 ГГц (в 2 раза более производительный процессор, чем в *Raspberry Pi 1*), 1 Гб ОЗУ, 40 пинов *GPIO* и имеет встроенный *Wi-Fi* интерфейс с поддержкой стандарта 802.11n (устройства 802.11n могут обеспечить скорость передачи или приема данных по одной антенне до 150Мбит/с). Также имеет разъемы *Ethernet*, *USB*, *HDMI* (сокр. от англ. *High Definition Multimedia Interface*, «Интерфейс для мультимедиа высокой четкости»). В своей ценовой категории (35\$

или примерно 2000 рублей на январь 2018 года) *Raspberry Pi 3 model B* имеет преимущество среди конкурентов за счет своих вычислительных мощностей. Согласно документации [14], *Raspberry Pi 3 model B* потребляет в среднем 850мА (от 700 до 1000, в зависимости от подключённых периферийных устройств) при напряжении 5.09В (напряжение, подаваемое на *Micro-USB* порт), потребляя таким образом 4.3В. Также *Raspberry Pi 3 model B* имеет большое пользовательское сообщество, развивающее систему. На данном устройстве создано множество проектов, подробно описанных на официальном сайте сообщества. Каждый желающий может выложить собственный проект или принять участие в проектах сообщества.

Главной задачей межсетевых ретрансляторов является обеспечение защиты процесса сетевого взаимодействия, поэтому на каждом этапе передачи данных должно производиться шифрование.

Если трафик передается через сеть, в которой он может быть скомпрометирован (через сеть, не являющуюся доверенной) (см. рис. 1), то данные, передаваемые пользователем, могут быть легко перехвачены злоумышленником. Особенно, если пользователь обращается к сайтам по небезопасному *HTTP*-протоколу (сокр. от англ. *HyperText Transfer Protocol* — «Протокол передачи гипертекста») или передает *Cookie*-файлы.

Межсетевым ретранслятором в данном случае является узел сети не являющийся доверенной. Пользователь выступает узлом только внутренней *Wi-Fi* сети, созданной межсетевым ретранслятором. Трафик между пользователем и межсетевым ретранслятором зашифрован, злоумышленники смогут перехватить лишь зашифрованный средствами *WPA2* (сокр. от англ. *Wi-Fi Protected Access 2*, «Защищенный доступ *Wi-Fi 2*») трафик.

При обращении пользователя к какому-либо ресурсу, межсетевым ретранслятором отправляет трафик в сеть *Tor* или *I2P*. Перед тем, как трафик дойдет до входного узла *Tor* или первого узла в цепочке *I2P*, он должен пройти через шлюз сети (не являющийся доверенной), который получит многослойно зашифрованный трафик, предназначенный для узла сети *Tor* или *I2P*.

Но на этапе передачи трафика от шлюза к первому узлу цепочки *Tor* или *I2P* (см. рис. 2) могут возникнуть проблемы при использовании *Tor*. Дело в том, что список всех узлов находится в открытом доступе, а значит шлюз может определить, что трафик предназначен для узла сети *Tor*, и заблокировать его передачу. В таком случае, следует вести передачу данных через отдельный *VPN*-сервер, либо через «мостовые» узлы (англ. *Bridge Relays*), алгоритм выдачи которых генерирует лишь несколько вариантов для одного *IP* адреса. Весь пул мостов публично недоступен.



Рис. 1. Путь трафика по сети, в которой он может быть скомпрометирован

В данной работе подключение межсетевого ретранслятора к сети происходит через *Ethernet*-интерфейс, а подключение пользователя к нему через *Wi-Fi*. При правильной настройке к ретранслятору можно подключиться с любого устройства, которое имеет встроенный *Wi-Fi*

интерфейс или внешний *Wi-Fi* адаптер. На рисунке 3 представлена блок-схема, отображающая процесс взаимодействия пользователя и устройства межсетевого ретранслятора, реализованного в данной работе.

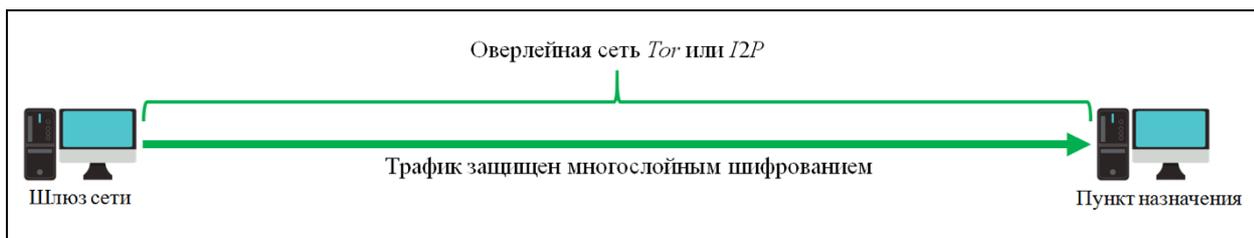


Рис. 2. Путь трафика через оверлейные сети до пункта назначения

Кроме обеспечения защиты сетевого взаимодействия следует обеспечить удобность использования межсетевого ретранслятора. Для переключения между сетями *Tor* и *I2P* пользователю пришлось бы подключаться по протоколу удаленного доступа *SSH* (сокр. от англ. *Secure Shell*, «Безопасная оболочка») к межсетевому ретранслятору, затем менять настройки перенаправления трафика, задействовать нужный сетевой клиент. Данный процесс занимает много времени, требует от пользователя знания терминальных команд, правил *Iptables* и требует проброса *SSH* туннеля. Разумеется, такой процесс неудобен для пользователя.

*Raspberry Pi 3 model B*, имеет 40 пинов *GPIO*, которые можно использовать для переключения между переводом трафика через *Tor* или *I2P*. На пины *GPIO* можно подключить ключ на нормально разомкнутых контактах (кнопку), при нажатии на который будет осуществляться смена оверлейных сетей. Скрипт изменения сети будет запускаться при включении компьютера автоматически (см. рис. 3).

### III. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ОПИСАНИЕ ПЛАНИРУЕМЫХ УЛУЧШЕНИЙ РЕШЕНИЯ

После реализации устройства межсетевого ретранслятора было проведено тестирование устройства в различных *Wi-Fi* сетях, как в открытых, так и частных.

Тестирование проводилось методами активного и пассивного анализа трафика при помощи сканеров, sniffеров, зондеров, пентеста и др.

В частности, проводилось тестирование при помощи *SharkTap Gigabit Network Sniffer* в открытой и частной сети. Для анализа трафика, проходящего через *SharkTap*, использовалась программа *WireShark 2.6.0*.

В результате тестирования было выявлено, что трафик действительно шифруется устройством и корректно передается в сеть *Tor* и *I2P* через шлюз.

Межсетевой ретранслятор на данный момент подключается к внешней сети при помощи *Ethernet*-интерфейса, а пользователь подключается к нему через *Wi-Fi* интерфейс. Не во всех ситуациях устройство сможет подключиться к внешней сети, и не всегда пользователь сможет подключиться к нему из-за доступных ему способов подключения. Например, смартфон или ноутбук пользователя может не иметь встроенного *Wi-Fi* интерфейса. В таком случае следует воспользоваться внешним *Wi-Fi* адаптером, но тогда требуется его наличие у пользователя. Другой пример: межсетевого ретранслятор не всегда может подключиться к внешней сети, имея лишь один *Wi-Fi* интерфейс, который уже настроен как точка доступа.

В качестве варианта повышения универсальности улучшения универсальности устройства – создание второй кнопки на межсетевого ретрансляторе.

Если первая кнопка отвечает за переключение между оверлейными сетями, то вторая должна будет изменять настройки *Wi-Fi* и *Ethernet* интерфейсов, меняя их местами. То есть, если до нажатия на кнопку, устройство подключалось к внешней сети через *Ethernet*-разъем, а пользователь подключался к межсетевому ретранслятору через *Wi-Fi* интерфейс, то после нажатия для подключения к внешней сети используется *Wi-Fi* интерфейс, а пользователь подключается через *Ethernet*.

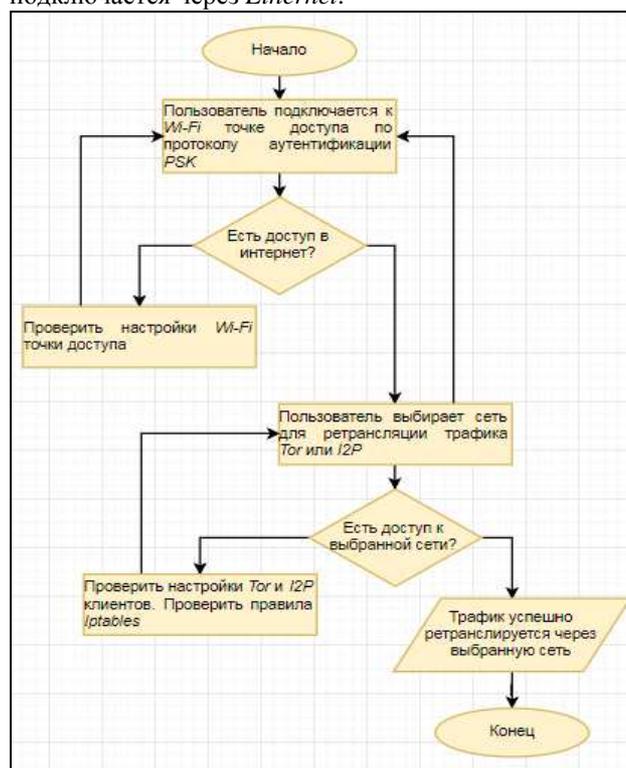


Рисунок 3. Блок-схема взаимодействия пользователя с устройством межсетевого ретранслятора

Благодаря такому улучшению устройство межсетевого ретранслятора станет более универсальным.

Как уже было сказано ранее – список адресов узлов *Tor*, за исключением «мостов», находится в открытом доступе. Для использования «мостов» нужно изменить настройки *Tor*-клиента на устройстве межсетевого ретранслятора, что не всегда возможно.

Для решения проблемы блокировки *Tor* можно расположить *VPN*-сервер в «доверенном» сегменте сети и направлять трафик пользователя через этот сервер. То есть, межсетевого ретранслятор будет обращаться к узлу *Tor* через *VPN*-туннель.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы была разработана и реализована программная часть межсетевого ретранслятора на базе одноплатного компьютера *Raspberry Pi 3 model B* с использованием оверлейных технологий *Tor* и

*I2P*. Предлагаемое решение предназначено для обеспечения защиты процесса передачи данных в вычислительных сетях, не являющихся доверенными. Предложенное решение было успешно апробировано.

В ходе тестирования было подтверждено, что устройство отвечает всем поставленным требованиям и успешно справляется со своими задачами: трафик передается в зашифрованном виде, пользователь имеет доступ к сетям *Tor* и *I2P*, в которые ретранслируется трафик. Выбор сети осуществляется при помощи кнопки, подключенной к *GPIO* устройства.

Тестирование устройства производилось с использованием механизмов активного и пассивного анализа трафика и информационных ресурсов (сканеров, sniffеров, зондеров, пентеста и др.).

Было установлено, что пакеты передаются в зашифрованном виде и корректно ретранслируются в сеть *Tor* или *I2P*, в зависимости от того, какая сеть выбрана. Уязвимости операционной системы и используемых компонентов были устранены.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Murdoch, St. J., Danezis G. Low-cost traffic analysis of Tor. St. J. Murdoch. IEEE symposium on security and privacy (IEEE S&P 2005): proc., USA, Oakland, 8–11 May 2005. [USA]: IEEE, 2005. P. 183–195.
- [2] Schimmer, L Peer profiling and selection in the I2P anonymous network. Lars Schimmer. Extended abstracts of the fourth privacy enhancing technologies convention (PET-CON 2009.1). Dresden: TU, Fak. Informatik, 2009. P. 59–70. (Technische Berichte).
- [3] Timpanaro, J. P., Chrisment I., Festor O. Improving content availability in the I2P anonymous file-sharing environment. Cyberspace Safety and Security: proc. of the 4 intern. symp. on cyberspace safety and security, Australia, Melbourne, December 2012. Melbourne: IEEE, 2012. P. 77–92. – (LNCS; vol. 7672).
- [4] Kono K., Nakano S., Ito Y., Babaguchi N. Theoretical analysis of the performance of anonymous communication system 3-mode net. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 2010. Vol. E93-A. № 7. P. 1338–1345.
- [5] Wiangsripanawan R., Susilo W., Safavi-Naini R. Design principles for low latency anonymous network systems secure against timing attacks. Proceedings of the fifth Australasian symposium on ACSW frontiers, ACSW '07. Darlinghurst, 2007. Vol. 68. P. 183–191.
- [6] Danezis G., Diaz C., Syverson P. Systems for anonymous communication. CRC Handbook of Financial Cryptography and Security. London: Chapman & Hall, 2010. P. 341–390. (CRC Cryptography and Network Security).
- [7] Egger Chr., Schlumberger J., Kruegel Chr., Vigna G. Practical attacks against the I2P network. Research in

- Attacks, Intrusions, and Defenses: proc., 16 intern. symp., RAID 2013. 2013. P. 432–451. (LNCS ; vol. 8145).
- [8] Schomburg, J. Anonymity techniques – usability tests of major anonymity networks. Extended abstracts of the Fourth Privacy Enhancing Technologies Convention (PET-CON 2009.1). Dresden: TU, Fak. Informatik, 2009. P. 49–58. (Technische Berichte).
  - [9] Ruiz-Martínez, A. A survey on solutions and main free tools for privacy enhancing Web communications. Journal of Network and Computer Applications. 2012. Vol. 35, iss. 5. P. 1473–1492.
  - [10] Mulazzani M., Huber M., Weippl E R. Anonymity and monitoring: how to monitor the infrastructure of an anonymity system. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. C: Applications and Reviews. 2010. Vol. 40, iss. 5. P. 539–546.
  - [11] Басыня Е.А., Головченко И.В. Алгоритмы управления трафиком в оверлейной сети I2P. Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: материалы 14 междунар. науч.-практ. конф. Санкт-Петербург: ИИУНЦ "Стратегия будущего". 2016. Т. 1. С. 97–102. ISSN 2307-1354.
  - [12] Авдошин С.М., Лазаренко А.В. Методы деанонимизации пользователя Tor. Информац. технологии. 2016. № 5. С. 362–372. ISSN 1684-6400
  - [13] Anonabox review. bestVPN URL: <https://www.bestvpn.com/anonabox-review-2/>.
  - [14] Raspberry Pi. 3 Power Supply. URL: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/power/README.md>.



**Евгений Александрович Басыня** защитил кандидатскую диссертацию в 2015 году. Продолжил педагогическую и научную деятельность в Новосибирском государственном техническом университете в должности доцента кафедры Автоматики. В 2016 году при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере открыл Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий.

**E-mail:** [director@nii-ikt.ru](mailto:director@nii-ikt.ru)



**Антон Александрович Юшманов** – студент 4-го курса факультета автоматики и вычислительной техники НГТУ

**E-mail:** [anton-yush@mail.ru](mailto:anton-yush@mail.ru)

Статья поступила 6 февраля 2018 г.

### Development of cross-network relay

Е.А. Basyanya<sup>1,2</sup>, А.А. Yushmanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Research Institute of Information and Communication Technologies, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University,

Novosibirsk, Russian Federation

*Abstract:* This article describes the process of implementation the software part of cross-network relay on single board computer Raspberry Pi 3 model B which was selected as hardware part. Comparative analysis of existing analogues such as VPN-сервисы, VPN-роутеры, Anonabox, Onion Pi was also done. The result of the analysis revealed that none of them gives the possibility of selecting a network for relaying. Existing solutions offers traffic relaying for VPN-servers or Tor network. Implemented device gives its user opportunity to relay traffic to different networks at user's choice. As networks for traffic relaying, there are such overlay networks as Tor (The Onion Router) and I2P (Invisible Internet Project) that works over of Internet protocol suite in the Internet. In the future, was planned add networks as RetroShape, Freenet and others for increasing user's facilities. During the work, the key was added to Raspberry's GPIO (General-Purpose Input/Output) on normally open contacts and the program was written to switch between networks for relaying traffic. Providing a comfortable interaction between the user and the cross-network relay. The work describes the planned enhancements to the cross-network relay to increase the device's versatility achieved by changing the configuration of the network interfaces of the hardware module, and to bypass unwanted traffic locks in untrusted networks. The implemented solution designed to protect the process of data transfer in computer networks that are not trusted.

*Key words:* overlay technologies, overlay networks, Tor, I2P, VPN-service, VPN-provider, Wi-Fi

## REFERENCES

- [1] Murdoch, St. J, Danezis G. Low-cost traffic analysis of Tor. St. J. Murdoch. IEEE symposium on security and privacy (IEEE S&P 2005): proc., USA, Oakland, 8–11 May 2005. [USA]: IEEE, 2005. P. 183–195.
- [2] Schimmer, L Peer profiling and selection in the I2P anonymous network. Lars Schimmer. Extended abstracts of the fourth privacy enhancing technologies convention (PET-CON 2009.1). Dresden: TU, Fak. Informatik, 2009. P. 59–70. (Technische Berichte).
- [3] Timpanaro, J. P., Chrisment I., Festor O. Improving content availability in the I2P anonymous file-sharing environment. Cyberspace Safety and Security: proc. of the 4 intern. symp. on cyberspace safety and security, Australia, Melbourne, December 2012. Melbourne: IEEE, 2012. P. 77–92. – (LNCS; vol. 7672).
- [4] Kono K., Nakano S., Ito Y., Babaguchi N. Theoretical analysis of the performance of anonymous communication system 3-mode net. IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences. 2010. Vol. E93-A. № 7. P. 1338–1345.
- [5] Wiangsripanawan R., Susilo W., Safavi-Naini R. Design principles for low latency anonymous network systems secure against timing attacks. Proceedings of the fifth Australasian symposium on ACSW frontiers, ACSW '07. Darlinghurst, 2007. Vol. 68. P. 183–191.
- [6] Danezis G., Diaz C., Syverson P. Systems for anonymous communication. CRC Handbook of Financial Cryptography and Security. London: Chapman & Hall, 2010. P. 341–390. (CRC Cryptography and Network Security).
- [7] Egger Chr., Schlumberger J., Kruegel Chr., Vigna G. Practical attacks against the I2P network. Research in Attacks, Intrusions, and Defenses: proc., 16 intern. symp., RAID 2013. 2013. P. 432–451. (LNCS ; vol. 8145).
- [8] Schomburg, J. Anonymity techniques – usability tests of major anonymity networks. Extended abstracts of the Fourth Privacy Enhancing Technologies Convention (PET-CON 2009.1). Dresden: TU, Fak. Informatik, 2009. P. 49–58. (Technische Berichte).
- [9] Ruiz-Martínez, A. A survey on solutions and main free tools for privacy enhancing Web communications. Journal of Network and Computer Applications. 2012. Vol. 35, iss. 5. P. 1473–1492.
- [10] Mulazzani M., Huber M., Weippl E R. Anonymity and monitoring: how to monitor the infrastructure of an anonymity system. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. C: Applications and Reviews. 2010. Vol. 40, iss. 5. P. 539–546.
- [11] Basynya EA, Golovchenko IV Traffic management algorithms in the I2P overlay network. Fundamental and applied research in the modern world: materials 14 Intern. scientific-practical. Conf. Saint-Petersburg: IINC "Strategy of the Future". 2016. T. 1. P. 97–102. ISSN 2307-1354.
- [12] Methods for deanonymization of the user Tor / SM Avdoshin, AV Lazarenko. Inform. technologies. 2016. No. 5. P. 362–372. ISSN 1684-6400. Anonabox review. bestVPN. URL: <https://www.bestvpn.com/anonabox-review-2/>.
- [13] Raspberry Pi. 3 Power Supply. URL: <https://www.raspberrypi.org/documentation/hardware/raspberrypi/power/README.md>.



**Evgeny Alexandrovich Basinya** defended his PhD thesis in 2015. He continued his teaching and research activities as an associate professor at the automation department in the Novosibirsk State Technical University. In 2016, he set up the Research Institute of Information and Communications Technologies with the support of the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology and is now its director.

**E-mail:** [director@nii-ikt.ru](mailto:director@nii-ikt.ru)



**Anton Alexandrovich Yushmanov** is a 4<sup>th</sup> year student of the Faculty of Automation and Computer Science at the NSTU

**E-mail:** [anton-yush@mail.ru](mailto:anton-yush@mail.ru)

The paper was received on February, 6, 2018.

## **VI. Инструментарий теории замкнутых динамических систем для физических и технических наук. К сведению авторов.**

### **Содержание раздела:**

- ◇ В.А. Жмудь. Относительность в свете теории замкнутых систем и критика ее критики. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 91–116.
- ◇ Д.О. Терешкин, В.М. Семибаламут. Современные методы измерения частоты и фазы в реальном времени. Сибирское отделение геофизической службы СО РАН, Новосибирск Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 117–130.
- ◇ Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия». С. 131–135.

# Относительность в свете теории замкнутых динамических систем и критика ее критики

В.А. Жмудь

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

*Аннотация:* Основные недостатки теории относительности порождены недостаточным математическим аппаратом. Авторы этой теории и ее продолжатели не владели аппаратом теории замкнутых динамических систем (автоматики, автоматического управления). Поэтому ими не найдены объяснения феноменов, которые с учетом этой теории и ее математического аппарата могут быть объяснены по-новому. В этом случае постулаты теории относительности оказываются не только излишними, но и достоверно ошибочными, по меньшей мере, в их совокупности. Т.е. один из двух достоверно ошибочен. В данной статье, являющейся продолжением дискуссии на эту тему, продолжается обсуждение книги Владимира Бояринцева «АнтиЭйнштейн» [1], начатое в нашей предыдущей публикации [2]. Данная статья направлена на извлечение полезных мыслей, цитат, аргументов из этой публикации, которую, к сожалению, в целом следует оценить отрицательно. Отрицательная оценка публикации основана, прежде всего, на большом количестве признаков антинаучности этой публикации вопреки тому, что она написана доктором физико-математических наук и затрагивает именно физико-математические науки. Прежде всего, анализ национальности, религиозных пристрастий, человеческих качеств, бытовых отношений и прочих деталей личности Эйнштейна не имеет никакого отношения к вопросу об истинности или ложности его теории, даже если бы такой анализ был осуществлен научными методами, т.е. со ссылкой на достоверные источники. Также любые сведения о сторонниках или противниках какой-либо научной теории могут носить лишь познавательный характер, но никак не могут служить доказательством или опровержением этой теории. Критика осуществлена бессистемно, она не завершается никакими позитивными предложениями о том, какую же в этом случае теорию следует принять, если, согласившись с автором этой публикации все же отказаться от теории относительности. Объединение в какие-либо коалиции по принципу «враг моего врага – мой друг» недопустимы в науке, поскольку не всякий, кто критикует теорию, с которой нельзя согласиться, автоматически попадает в перечень справедливо критикующих ученых. Однако при всех недостатках данная книга может служить источником для обдуманного разбора, если из нее извлечь по крупицам то немногое ценное, с чем следует согласиться. Кроме того, ошибки в данной публикации также могут послужить науке как пример антинаучных рассуждений или как информационный повод для устранения неясностей в обсуждаемом круге вопросов. Данная статья тяготеет в теории автоматического управления, поскольку, как ранее многократно указывалось, вопросы, обсуждаемые и решаемые теорией относительности, по явным признакам постановки задачи могут быть отнесены именно к области анализа замкнутых динамических систем, нехватка эрудиции в этой области как раз и способствовала некоторым ошибочным тезисам обсуждаемой теории.

*Ключевые слова:* теория относительности, Эйнштейн, релятивизм, научные критерии, истинность, гипотеза, теория

## ВВЕДЕНИЕ

Данная публикация продолжает дискуссию на тему книги В. Бояринцева вследствие актуальности поднимаемых вопросов при всех ее недостатках и в значительной мере отсутствия научного метода в большей части аргументации в этой книге [1].

О недостатках этой книги уже было сказано в статье [2]. Но истинно научные подходы к критике требуют не только указания на недостатки, но и выявление достоинств анализируемой публикации.

Если недостатки книги, возможно, очевидны большинству непредвзятых читателей, то ее достоинства следует выискивать с карандашом в руках, что мы и сделали. К таким достоинствам можно отнести следующее.

1. Относительно обширная библиография, хотя и предвзято отобранная с явным игнорированием части актуальных публикаций на эту тему.

2. Некоторые верные тезисы, предваряющие или обобщающие некоторые цитаты.

3. Некоторые полезные цитаты даже в том случае, если их трактовка не вполне верная.

4. В целом критическая позиция, нацеленная на устранение недостатков теории относительности и даже на устранение всей этой теории в целом.

К явным недостаткам отнесем следующие особенности этой публикации.

1. Предвзятость библиографии и неполнота.

2. Обилие ошибочных тезисов.

3. Некоторые неуместные цитаты.

4. Позиция автора в целом, основанная на отрицании всего, что исходит от автора теории относительности, вне зависимости от истинности или ложности этого.

5. Ярко выраженная националистическая позиция автора книги, состоящая в отрицании возможности чего-либо положительного у автора теории относительности по причинам его национальной принадлежности.

## I. ПОЛЕЗНЫЕ ЦИТАТЫ

*«Всё уже описано. К счастью, не обо всём ещё подумано»*

С.А. Леу [3]

В числе прочих приводится следующее высказывание Л. Ландау: «Величайшим достижением человеческого гения является то, что человек может понять вещи, которые он уже не в силах вообразить» [1]. Это высказывание очень напоминает афоризм С. Е. Леца: «Техника достигнет такого совершенства, что человек сможет обходиться без себя», а также афоризм, вынесенный в эпиграф к этому разделу [3].

Следует согласиться с авторским утверждением: «Схема логического мышления такова: правильные исходные данные – правильное мышление – правильный результат. Не может быть такой «логики»: правильные исходные данные – «не могу себе представить, что здесь происходит» – правильный результат» [1]. Но все же схема более сложна. Правильный результат может получиться даже случайно, вопрос в том, как можно обосновать его правильность. А это делается на основании экспериментального подтверждения тех теоретических положений (новых), которые следуют из рассматриваемой теории (и не следовали ни из каких предшествующих теорий). Если новые выводы новой теории (точнее – гипотезы) подтверждаются, есть существенные основания для принятия такой теории, если же они не подтверждаются, это говорит против этой теории. Хотя окончательного приговора тут быть не может, поскольку и подтверждения, и опровержения могут быть ошибочными. Поэтому к любой теории всегда можно возвращаться, исследовать обоснованность ее принятия, если выявились новые факты или новые теоретические основания для такого пересмотра.

Также приводится высказывание Луи де Бройля: «История наук показывает, что прогресс науки постоянно тормозится титаническим влиянием определенных концепций, которые стали, в конце концов, рассматриваться как догмы. По этой причине необходимо периодически подвергать весьма глубокому исследованию принципы, которые, в конечном счете, стали применяться без обсуждения» [1]. Безусловно, автор высказывания не имел в виду теорию относительности, и, безусловно, ее следовало бы иметь в виду в таком контексте.

Также любопытна цитата из Эйнштейна: «Тому, кто творит, плоды собственной фантазии кажутся настолько необходимыми и естественными, что он сам их считает не образами мышления, но заданными реальностями и хочет, чтобы все так считали» [1]. В данном случае Эйнштейн, сам того не подозревая, «сам себя высек».

Наш взгляд основан на изучении большого объема литературы, из которых наиболее важны публикации [6, 7], а также все публикации Эйнштейна. Наши доводы изложены в публикациях [8–16].

## II. ПРАВИЛЬНЫЕ ТЕЗИСЫ

*«Одни хотели бы понимать то, во что верят, а другие поверить в то, что понимают»*

С.Е. Леу [3]

### 2.1. Верные тезисы о материи

Автор верно пишет, что «материя, пространство и время:

- никогда не создавались и не могут быть никаким способом уничтожены;

- являются линейными и не могут зависеть от частных явлений, пространство евклидово, время непрерывно и линейно;

- Вселенная в среднем всегда имела, имеет и будет иметь один и тот же вид, никакого «начала» или «большого взрыва» у нее не было, никуда она не разбегается, и конца существования у нее не будет никогда; ...

- все теории, не соответствующие безусловности материи, пространства и времени, изначально неверны и не должны приниматься во внимание» [1].

Здесь мы выпустили четвертый по порядку тезис, так как он требует разъяснений. Также приходится указать на то, что, хотя автор книги сообщает о себе, что он доктор физико-математических наук, он, по-видимому, не достаточно осведомлен о том, как следует составлять перечни утверждений. Дело в том, что их следует составлять как одинаковые члены предложения, т.е. перечисляемые пункты либо все должны быть дополнениями, либо все определениями, либо все сказуемыми и т.д. Если мы возьмем вводные слова к перечню и применим их к первым двум пунктам, получим логически грамотные предложения: «Материя, пространство и время никогда не создавались...», «Материя, пространство и время являются линейными...». В отношении других позиций этого перечня получаются безграмотные по форме предложения: «Материя, пространство и время Вселенная в среднем всегда имела...» и т.д. Поэтому следовало в этих тезисах слова «Материя, пространство и время» поставить в начало первого и второго тезиса, а остальные тезисы формулируются без этих вводных слов.

### 3.2. Не обоснованный, а потому не обязательно верный тезис о материи

Четвертым среди этого перечня стоит утверждение: «Не существует никаких предпочтительных масштабов на всех иерархических уровнях организации материи действуют одни и те же законы; не существует никаких

особых законов в микромире» [1]. У нас нет оснований ожесточенно оспаривать этот тезис, но в равной степени нет достаточных оснований для выдвигания этого тезиса. Интуитивно можно согласиться с ним частично, а именно в той части, что не имеется достаточных оснований для того, чтобы утверждать, что свойства энергии принципиально дискретны, и что на этом основании в явлениях на уровне атомарных масштабов действуют какие-то принципиально иные законы материи, нежели законы, действующие в масштабах обычного восприятия человека. Однако мы не можем строго утверждать этого для всех явлений в целом. Кроме того, следует признать, что в микромире масштабы явлений чрезвычайно малы, тогда как скорости движения частиц чрезвычайно велики. Это приводит, с одной стороны, к чрезвычайно сильной зависимости сил от положений частиц, с другой стороны, к чрезвычайно сильной зависимости фактически приложенных к частицам сил (не только их величину, но и направление) от запаздывания действия сил вследствие конечной скорости распространения этих сил. В совокупности эти два фактора приводят к тому, что известные из макроявлений физические законы проявляют себя в микромире совершенно по-иному, хотя их принципиальная суть при этом не обязательно изменяется. Более того, можно предполагать, что суть этих законов не изменяется вовсе, лишь добавляется необходимость учета этих двух факторов, поэтому законы должны быть записаны более корректно для того, чтобы получить более корректные результаты.

Например, широко известный закон Кулона сформулирован для точечных зарядов и справедлив в статических условиях. Согласно этому закону, сила, с которой два точечных заряда действуют друг на друга, обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними и пропорциональна произведению этих зарядов. В микромире невозможна такая ситуация. Размеры заряженных частиц, какими бы они маленькими ни были, могут оказаться такими, что нельзя ими пренебрегать, поскольку величина сближения этих зарядов может быть соизмеримой и даже меньше, чем радиусы этих зарядов. При соударениях заряды никак не точечные, поэтому закон Кулона без дополнительных уточнений не применим. С другой стороны, закон сформулирован для статики, тогда как элементарные частицы в статическом состоянии никогда не находятся, поэтому также должно быть введено уточнение, которое описывает влияние скорости движения этих зарядов на действующие между ними силы. Без такой оговорки четвертый тезис не точен, но и с ней он может выдвигаться лишь гипотетически, или лишь в ограниченных шкалах изменения масштабов, поскольку человечество не обладает инструментарием расширять свои познания по

этой шкале вглубь и вширь. Мы не можем заглянуть внутрь электрона и описать те процессы, которые в нем происходят (во всяком случае, на современном этапе развития науки), тем более мы не можем сказать, из чего состоит нейтрино, и как движутся те частицы, из которых оно состоит. Также точно мы не можем заглянуть в космос далее, чем это позволяет современный инструментарий астрономии, поэтому выведение четвертого тезиса по индукции возможно лишь как гипотезы, а его практическое значение ничтожно, поскольку ни доказать его, ни опровергнуть, невозможно.

Можно привести и доводы против этого тезиса. Материя при ее рассмотрении в масштабах, соответствующих ощущению человека, преимущественно не дискретна, а непрерывна. Однако с незапамятных времен древние индийские и древние греческие философы ввели понятие наименьшей неделимой части материи, которая впоследствии получила греческое название атом. С этой позиции уменьшение масштабов рассмотрения явлений не может не изменить характер всей картины. Можно, по-видимому, говорить и о некотором изменении законов материи. Действительно, если разделить пополам свинцовый брусок, будет два свинцовых бруска. Если продолжать деление одной из полученных половин, будет четвертая часть, восьмая, и так далее, но это будет все тот же свинец. Если же дойти до размеров атома, то этот «закон» прекращает действовать: далее атом свинца нельзя разделить на две части, чтобы полученные части также были свинцом – это уже будет не свинец. В этом плане атом – неделим. Но ведь атом состоит из чего-то (мы знаем, что он состоит из ядра и электронов, ядро состоит из протонов и нейтронов), следовательно, чисто теоретически любой атом можно разделить на части (на практике это делалось не с любыми атомами, но этот тезис все же не вызывает сомнений). Легко придти к выводу, что и протоны, и нейтроны состоят из каких-то более мелких частиц. Чтобы эти более мелкие частицы могли образовать протоны и нейтроны, безусловно, требуются силы, которые соединяют эти частицы. Эти силы, безусловно, распространяются в пространстве с некоторой скоростью. Безусловно также и то, что эта скорость может совпадать со скоростью света, но более вероятно, что она намного больше. Она уж точно не может быть меньшей, чем скорость света. Но и эти частицы, по-видимому, состоят из более мелких частиц, которые также соединены воедино вследствие действия каких-то иных сил. Скорость взаимодействия с помощью этих сил, безусловно, намного выше, чем скорость света, иначе эти частицы распались бы при движениях со скоростями, близкими к скорости света, а эти частицы как раз и движутся только с такими скоростями. Следовательно, материальный мир принци-

пиально дискретен, законы макромира принципиально не могут быть распространены для любых задач сколь угодно малого масштаба. Но верным может оказаться тезис о том, что для рассмотрения процессов в молекулах и атомах нет необходимости прибегать к гипотетическим дополнительным законам и гипотетическим дополнительным силам; может оказаться, что наших пониманий законов природы на макроуровне достаточно для объяснения структуры атомов и их свойств, просто ранее эти законы применялись недостаточно последовательно и полно, о чем мы уже многократно писали [10].

В отношении энергии, которая является количественной мерой движения, такое утверждение сомнительно, оно не выводится с такой же легкостью. Напротив, оно опровергается. Рассмотрим в достаточной степени малую частицу весьма сильно изолированную от других тел, чтобы можно было достаточно точно (хотя бы в теории) описать энергию ее движения относительно некоторой заданной системы отсчета. Будем рассматривать лишь кинетическую энергию. Ничто в теории не мешает этой чистоте изменить свою скорость на сколь угодно малую величину. Следовательно, ничто в теории не мешает получить сколь угодно малое кинетическое приращение энергии этой частицы. Предположим теперь, что мы вели речь об одной из элементарных частиц. Ее кинетическая энергия – это и есть вся ее энергия (не будем пока говорить о массе, которая также в некоторых трудах приравнивается к энергии, во всяком случае, пусть в рассматриваемом случае масса частицы не изменяется). Масса этой частицы чрезвычайно мала, скорость же может быть любой. Следовательно, приращение скорости может быть любым, следовательно, и приращение энергии может быть любым, сколь угодно малым. Мало того, если эта скорость изменяется, она последовательно проходит одно значение за другим. Следовательно, энергия этой частицы может последовательно изменяться от одного значения к другому плавно. Здесь нет дискретности. Следовательно, масса принципиально дискретна, энергия принципиально не дискретна. Во всяком случае, четвертый тезис подвергнут обоснованным сомнениям.

### 3.3. Недостаточно верный тезис о том, что все частицы созданы из одного и того же материала с необходимым уточнением об античастицах

Далее выдвигаются следующие тезисы.

«Учитывая, что к настоящему времени выявлено громадное количество элементарных частиц... и что все они способны трансформироваться друг в друга, следует полагать, что все они состоят из одного и того же строительного материала» [1]. С этим тезисом

следует согласиться, но мы сделаем оговорку, что выявление античастиц – это один из мифов, основанный на ошибочной трактовке результатов эксперимента. На самом деле любая заряженная частица, движущаяся со скоростью света, взаимодействует с окружающими ее полями и через них с окружающими ее частицами так, как если бы место нее имелось две сближающиеся и соударяющиеся частицы (уничтожающиеся в результате соударения), каждая из которых до соударения двигалась бы со скоростью, меньше скорости света, но при этом одна из них обладала противоположным зарядом. Именно это ошибочно наблюдаемое явление носит название «аннигиляции». Оно ошибочно трактуется как объективно имеющее место. Виртуальная античастица трактуется как реально физически существующая. При этом теория молчит о том, откуда она появилась, как она ранее существовала, почему ранее она не была уничтожена от столкновения с другими частицами, почему соударение осуществляется именно «лоб в лоб», и почему все признаки античастицы (не только заряд, но и спин и прочее) всегда идентичны, но противоположны признакам частицы, которая участвует в соударении. Отметим, что никогда не была зафиксирована античастица в отсутствие ее антипода – правильной частицы, которая соударяется с ней, провоцируя полную «аннигиляцию». В случае принятия обоснованного предположения о том, что античастиц не существует, но частица способна двигаться со скоростью, превышающей скорость света (не только в веществе, но и в вакууме), все указанные особенности становятся очевидными. Также в этом случае очевидно и то, что в присутствии «третьей» частицы (на самом деле – «второй») траектории могут искривляться и частицы уже не обязательно движутся «лоб в лоб».

### 3.4. Правильная критика ошибочного тезиса о том, что вакуум является твердым телом

Автор пишет: «Впоследствии то, что световые волны поперечны, то есть направления колебаний и них перпендикулярны к направлению распространения, что возможно только в твердом теле, заставило приписать эфиру свойства упругого твердого тела». Действительно, имеет место такое заблуждение. Среди всех явлений, известных науке, за исключением распространения электромагнитных полей, поперечные волны, как предполагалось, распространяются только в твердых телах. На этом основании в частности Майкельсон утверждал, что вакуум следует представлять в виде твердого тела.

Разберем ошибку Майкельсона и его последователей. Являются ли волны на поверхности озера поперечными? Вещество (вода) перемещается преимущественно сверху вниз, т.е. перпендикулярно поверхности, а распрост-

ранение волн осуществляется по направлениям вдоль поверхности. Следовательно, волны на поверхности воды также поперечные.

Что имел в виду Майкельсон и его последователи, так это *поляризованные* свойства поперечных волн. Следовало бы указать, что поскольку свет может быть *поляризованным*, и он сохраняет свою поляризацию по мере своего распространения, и поскольку поляризованные поперечные волны во всех остальных случаях имеют место лишь в твердых телах, то на этом основании был сделан вывод о том, что вакуум – это твердая среда. Это, разумеется, ошибка.

Во-первых, в твердом теле возможно распространение не только продольных волн, но и поперечных волн тоже, а поперечные волны распространяются не только в твердом теле, но и на границе раздела сред. Во-вторых, следует понять причину сохранения поляризации света, и в этом случае будет понятно, что для этого вовсе не обязательно, чтобы среда была твердой. Звуковые волны, которые распространяются во всех средах, кроме вакуума, как правило, являются колебанием вещества по направлению распространения этих волн. Если стучать по торцу металлической рельсы, то будут возникать именно продольные волны, точно так же, как они возникают в воздухе от акустического динамика. В первом случае колебания вперед и назад одного торца рельсы порождает похожие колебания во всей кристаллической решетке этой рельсы. Во втором случае колебания вперед и назад мембраны динамика порождает череду сгустков и разреженностей газа, эти колебания распространяются в том же направлении, в котором они происходят. Но на самом деле все не вполне так. Ведь если бить не по торцу рельсы, а по ее боку, то в рельсе также будут возникать звуковые колебания. Эти колебания вперед и назад в направлении от удара будут порождать также колебания и в других направлениях в теле рельсы. Аналогично, звук распространяется и в направлении, перпендикулярном направлению движения звуковой мембраны. Следовательно, в точке зарождения колебаний они не всегда и не обязательно продольны, но на достаточном удалении от источника звука они в основном именно продольны. Это свойство преобразовывать все виды колебаний в продольные характерно и для твердых тел, и для газов, во всяком случае, в акустическом диапазоне частот.

В твердом теле поперечные волны, которые бы сохраняли свою поляризацию, представить достаточно сложно, если не рассматривать свет и иное электромагнитное излучение.

Лишь относительно медленное перемещение некоторой части твердого тела взад-вперед вдоль одной оси может, по-видимому, вызвать такие поперечные поляризованные

волны. Примером может служить очень гибкая длинная доска.

Причина поляризованных свойств электромагнитных волн состоит в том, как они порождаются и как они распространяются. Порождение и распространение их связано с тем, что колебания электрических полей, происходящие в одной плоскости, например, в направлении оси  $X$ , лежащей в плоскости  $XOZ$ , порождает колебания магнитных полей в другой плоскости, например, в направлении оси  $Y$ , лежащей в плоскости  $YOZ$ . В этом случае такие колебания распространяются в направлении оси  $Z$ , которая образуется пересечением этих двух плоскостей. Колебания, которые можно условно описывать как перемещения заряженных частиц, например, вверх и вниз, порождают колебания, которые условно можно описать как чисто магнитные, которые можно описать как закручивание по часовой стрелке и против часовой стрелки магнитного поля перпендикулярно оси, по направлению которой перемещаются условные заряды. Колебания с одними свойствами порождают ортогональные колебания с другими свойствами (хотя, конечно, эти два вида колебаний имеют в своей основе одну и ту же природу). Эти вторичные колебания вновь порождают колебания со свойствами первичных, и они вновь ортогональны колебаниям, явившимся их причиной. Производные колебания ортогональны исходным, производные от производных колебаний ортогональны производным, следовательно, параллельны исходным, и так далее. Возникает как бы цепь, каждое последующее звено которой обязательно лежит в плоскости, ортогональной плоскости предыдущего звена. Это и только это задает поляризованные свойства электромагнитного излучения.

Таким образом, тезис о том, что вакуум должен быть представлен как некая жесткая субстанция, ошибочен. Автор публикации [1] хотя и критикует этот тезис, все же заслужил критику за то, что говорит о поперечных волнах в том смысле, в каком следовало бы говорить о поперечных поляризованных волнах. При этом он ошибочно утверждает, что поперечные волны существуют лишь в твердых телах, забывая, что волны на поверхности жидкости также являются поперечными.

### **3.5. Правильное указание на тот факт, что преобразования Лоренца используются Эйнштейном в ином значении**

Автор пишет: «Исходя из признания существования эфира, Лоренцем были получены его преобразования, использованные Эйнштейном в специальной теории относительности с отказом от признания факта существования эфира». Это совершенно правильно, хотя и недостаточно глубоко.

**Преобразования Лоренца могут быть прямыми и обратными.** Если признать существования покоящегося эфира, то из этого вытекает признание единственной покоящейся системы, которую можно назвать выделенной, так как она выделяется из всех прочих своей уникальностью. Все размеры всех материальных тел, которые покоятся в этой системе, имеют свою максимальную длину. Согласно теории Лоренца, вследствие движения любого тела относительно эфира, его линейные размеры в направлении движения должны **сокращаться**. Это сокращение описывается преобразованием, в которое скорость входит во второй степени. Для вычисления длины такого движущегося тела исходную длину следует умножить на коэффициент, меньше единицы. Если теперь попытаться из длины движущегося тела вычислить, какова была бы его длина, если бы оно не двигалось, то необходимо осуществить **обратное преобразование**, то есть новую длину следует **не умножить, а разделить на этот коэффициент**. В этом случае получим исходный результат. При обратном переходе из подвижной системы в неподвижную, тела не сокращаются, а **удлиняются**, и это также – преобразование Лоренца, одна из его форм, а именно: **обратное преобразование Лоренца**. Всякое преобразование для перехода из одной системы координат в другую обязано обладать следующим свойством: при изменении знака скорости на противоположный оно должно стать противоположным, то есть обратным преобразованием, которое позволило бы из вторичной величины вычислить первичную. Также **необходимо, чтобы после последовательного применения прямого и обратного преобразования мы должны получить исходную величину**, какой бы она не была изначально. Поэтому если покоящийся его в эфире стержень был приведен в движение вдоль своей длины, то его длина должна, согласно преобразованиям Лоренца, сократиться (по наблюдениям из неподвижной системы). Но если мы будем решать обратную задачу, и вычислим, какова была бы длина, если бы стержень покоился (в этой неподвижной системе), то мы должны длину движущегося стержня разделить на коэффициент, меньший единицы, и получить большую длину, чем была использована в расчетах. Таковы преобразования Лоренца в их исходной формулировке. Для их применения необходимо знать истинную скорость изучаемой системы относительно выделенной покоящейся системы отсчета.

Напористость Эйнштейна при обсуждении этого тонкого момента вынудила Лоренца сдаться, отказаться от своей плодотворной идеи. Дело в том, что если мы не имеем способа отличать подвижную систему от неподвижной, то мы не можем и применять преобразования

Лоренца, так как не знаем истинной скорости какой бы то ни было системы отсчета.

Эту методическую трудность следовало просто принять как данность. На практике она не имеет значения, но зато она имеет колоссальное теоретическое значение. Она объясняет, почему мы не можем отличить подвижную систему от неподвижной. Если причина найдена, не столь уже важно, что мы не можем найти неподвижную систему, важно другое – она существует, и есть объяснение того, что мы не можем ее распознать. Для Эйнштейна важно было иное: если мы не можем понять, покоится ли наша система, или нет, мы имеем право допустить, что она покоится, равно как и допустить, что она не покоится, и каждое допущение будет истинным. В этом весь Эйнштейн. В науке так поступать нельзя. Да и на практике тоже: если я лично не могу отличить настоящую денежную купюру от фальшивой, это еще не доказывает, что они идентичны. Возможно, существуют методы, о которых мне неизвестно. Также и в физике. Невозможность отличия не тождественна отсутствию отличий. Но исторически Эйнштейн победил, поскольку его оппоненты не подыскали достаточно весомых контраргументов, и «истина» была назначена неявным голосованием, фактическим переходом большинства физиков на позиции Эйнштейна, что происходило болезненно и постепенно.

Проанализируем, чего мы лишились, и что приобрели. Если выделенная система отменена, как и отменен эфир, то преобразования Лоренца (в их исходном смысле) применять нельзя, поскольку не известно, имеет ли место увеличение длины, или уменьшение. В зависимости от того, какую из двух систем следует принять покоящейся, изменятся и рассуждения, и результаты. Но эти результаты не имеют отношения к наблюдаемым величинам. Объективных сокращений или удлинений мы наблюдать не можем, так как для измерения мы используем меры, которые также сокращаются или удлиняются. Вопрос о том, что на самом деле происходит, остается вне наших экспериментальных возможностей. Но такой подход позволяет отказаться от мистики, он возвращает нас в материализм. Совершенно не важно, кто из двух наблюдателей в двух разных лабораториях покоится (вместе с лабораторией), а кто движется. Если мы знаем в теории, что, по меньшей мере, одна из лабораторий движется, и, следовательно, по меньшей мере в одной из лабораторий, все размеры вдоль направления движения сократились (на пренебрежимо малую величину), но так как они сократились все, то наблюдатель в этой лаборатории этого заметить не может, то мы понимаем ситуации, понимаем ее причины и следствия. Разве этого мало?

Логическая ошибка Эйнштейна состоит в том, что в его заимствовании потерялась не

только причина таких преобразований (которая имеет под собой твердую физическую основу), но также и потерялась возможность использования этого преобразования, так как исчезло понятие скорости системы относительно выделенной системы. В любом преобразовании теперь Эйнштейн утверждал, что имеет место сокращение длины и только сокращение. Но это ошибка. Также Эйнштейн ошибочно утверждал, что только одно преобразование является таким, при котором выполняются два условия: все законы движения материальных тел остаются такими же, и скорость света в каждой системе остается такой же. Эйнштейн увидел, что преобразования Лоренца по своей математической форме записи отвечают этому требованию, но он не увидел, что вместо скорости со знаком плюс можно подставить скорость со знаком минус. По этой причине с одинаковой степенью обоснованности можно утверждать не только то, что длина движущегося стержня явно меньше длины покоящегося стержня, то и полностью противоположное утверждение, а именно, что длина движущегося стержня больше, чем длина покоящегося стержня.

Подобная анти-Эйнштейновская математика может вполне иметь место. Если в теории относительности везде вместо слова «уменьшается» написать «увеличивается» и наоборот, вместо «увеличивается» написать «уменьшается», везде вместо «замедляется» писать «ускоряется», а вместо «ускоряется» писать «замедляется», то будет получена также с математической точки зрения непротиворечивая (ровно в такой же мере, как СТО) новая теория, полностью противоположная СТО, но также дающая ответ на вопрос, почему опыт Майкельсона-Морли не позволил обнаружить эфирный ветер.

### 3.6. Правильное указание на то, что звездное небо доказывает наличие эфира

Автор пишет: «Никого не смущает факт, что мы не видим все «небо в алмазах», что свет от далеких звезд не доходит до Земли, хотя в предположении отсутствия эфира (физического вакуума) дальность распространения света должна быть бесконечной.

К сожалению, автор забывает, что в последних своих докладах и трудах Эйнштейн признал наличие эфира в том смысле, что должна иметь место физическая среда, которая ответственна за распространение электромагнитных и гравитационных полей. Только Эйнштейн не признавал за этой средой право иметь какую-то фактическую скорость в любой системе отсчета, иначе говоря, наличие единственной системы отсчета, в которой эта среда покоится с утверждением, что во всех остальных системах, которые не покоятся относительно этой системы, среда также не может считаться покоящейся.

Этого Эйнштейн признать не мог, но причина, по которой он не мог этого сделать, фактически уже опровергнута. Причиной послужило то, что иначе он не смог бы объяснить опыт Майкельсона, считая, что если вакуум не имеет никакой определенной скорости ни в какой среде, то это может объяснить отрицательный результат опыта Майкельсона. При этом Эйнштейн не учел, что этот опыт был поставлен отнюдь не в вакууме, а в воздухе, а воздух как раз и обладает этим свойством, которое Эйнштейн отрицал, так как воздух всегда имеет покой лишь в одной системе, а относительно других систем он обязательно движется. Это явление носит для воздуха название ветер. Для эфира это явление должно было бы носить название эфирный ветер. Поскольку эфирный ветер не был обнаружен, был сделан ошибочный вывод, что и эфира нет. Но ведь воздушный ветер в этом опыте тоже не был обнаружен, а опыт проводился в воздухе, а это отнюдь не опровергает существование воздуха.

### 3.7. О постоянстве скорости света

На стр. 114 сказано, что если не считать скорость света постоянной, то невозможно синхронизовать часы, а если так, то невозможно вообще писать какие-либо уравнения движения. «Выход из этой ситуации нашел Пуанкаре в принятии условного положения о постоянстве скорости света. Это условное положение о постоянстве скорости света было принято и в теории относительности в варианте Эйнштейна. ... Допущение о постоянстве скорости света Эйнштейну не принадлежит» [1, стр. 114].

### 3.8. О преимуществах знаний, полученных из эксперимента

«В физике, в частности, и в науке вообще существуют определенные правила, которые не позволяют принять на веру те математические разработки и формулы, которые не подтверждены опытным путем, или те, которые противоречат физике явления» [1, стр. 123]. Это справедливо. Но только надо было добавить, что соотношения могут быть безупречны с позиции математики, но при этом они могут оставаться лишь математическими соотношениями, не описывающими той физической ситуации, к которой они применяются. Следовательно, хотя они и верны сами по себе, все же их применение ошибочно. Но есть и такие соотношения, которые не только верны математически, но и совершенно точно описывают фактически наблюдаемые эффекты, вопреки тому, что в их основу положены неверные тезисы, и, полагаясь на них, мы получили бы ошибочное представление о сути природного явления, хотя при этом они верно описывают фактически наблюдаемые результаты. Например, в системе описания движений астрономических тел по Птолемею с математи-

ческой точки зрения все может оказаться совершенно точным. Но в этом случае, когда мы приняли бы центр Земли за начало координат системы отсчета, и ориентацию осей в пространстве также увязали бы с географическими ориентирами на поверхности Земли, мы могли бы получить математически точное описание движения небесных светил относительно Земли, но некоторые из них при этом должны были бы двигаться с чрезвычайно большим ускорением.

Попытка Эйнштейна создать в Общей теории относительности такую теорию, которая позволила бы брать за основу любые системы координат, не обязательно инерциальные, и в таких системах правильно описывать все явления, провалилась. Эйнштейн такой теории не создал, и она была и не нужна. Для чего нужна теория, в которой все явления описывались бы наиболее сложно?

Рассмотрим простой пример. Если мы считаем, что система, связанная со звездами, стационарна, то для перемещения звезд на небе нам достаточно понять, что планета Земля вращается. Если же мы примем Землю за стационарный объект, находящийся в начале координат новой системы, то даже самый малый поворот Земли означал бы очень существенное перемещение звезд на периферии. Для поворота Земли имеются объективные причины, тогда как для подобного перемещения всех звезд и планет, так, как это имеет место в системе, связанной с Землей, нет никакой возможности для отыскания физических причин столь быстрых перемещений, а также физических возможностей (без нарушения ограничения на скорость, которую дает теория относительности).

Оптимальный выбор предпочтительной системы основывается не только на желании иметь наиболее простые соотношения, но и на том факте, что все силы в любой системе должны действовать так, как им полагается, и приводить к тем результатам, которые должны быть, если верно применить верную теорию. Признание Солнца неподвижным, а Землю подвижной является объективно необходимым для рассмотрения процессов в масштабах Солнечной системы. Такой выбор еще не есть истина, но он более близок к истине, чем выбор Земли в качестве покоящейся системы отсчета. В этом смысле такой выбор является относительной истиной, то есть истиной в ограниченных условиях.

### 3.9. Об изменении темпов течения времени

Автор совершенно правильно отрицает зависимость времени в системе отсчета от скорости движения этой системы [1, стр. 128]. Действительно, если две звезды движутся равномерно и прямолинейно друг относительно друга, то большой вопрос, в какой из этих звезд

следует считать, что время замедляется и расстояния сокращаются. Это действительно так. Автор справедливо критикует утверждение из работы С.А. Фридмана о том, что якобы теория относительности многократно подтверждена экспериментально. Действительно, фактических подтверждений нет. Все эксперименты, которые где-либо когда-либо кем-либо упоминаются как «экспериментальное подтверждение теории относительности», всегда на поверку оказываются экспериментами, которые весьма хорошо могут быть объяснены и без этой теории [16].

### 3.10. Общая оценка теории относительности

Автор цитирует Ю. Писарева. «При более глубоком рассмотрении общая теория относительности (ОТО) оказывается несовместимой с фундаментальными законами природы – законами сохранения энергии, импульса и момента количества движения... Ни в макро-, ни в микромире пока нет ни одного экспериментального указания, прямо или косвенно ставящего под сомнение этих законов. Поэтому ОТО как теория, лишенная этих законов, с физической точки зрения не может считаться удовлетворительной... В силу сказанного выше это означает лишь одно: отказ от ОТО как физической теории» [24]. Это правильно, но не убедительно. При отказе от любой ошибочной теории недостаточно лишь сказать, что она ошибочна. Следует дать альтернативную теорию, которая бы обладала всеми требуемыми достоинствами и не обладала бы критикуемыми недостатками.

Всегда и всюду подобная критика заканчивается репликами со стороны релятивистов: «Да, мы и не скрываем, что в теории относительности остается много нерешенных проблем и противоречий. Но это – лучшая из всех существующих на сегодняшний день теорий, которая хоть как-то удовлетворительно объясняет всю совокупность всех известных физических явлений». Примерно такой ответ всегда признается наиболее взвешенным, правильным. Но ведь это не верно. Во-первых, альтернативная теория есть. По меньшей мере, существует изложенная нами в целом ряде статей концепция, которая свободна от недостатков теории относительности и от недостатков квантового подхода, но достаточно убедительно объясняет все известные результаты, которые трактуются как якобы необъяснимые с позиции классической физики, и, следовательно, как экспериментальные основания (а иногда и как доказательство) теории относительности. Поэтому недостаточно говорить, что ОТО ошибочна. Требуется еще полностью перечислить эти ошибки и дать альтернативное видение, новую теорию, что мы и старались сделать по мере сил. В разбираемой публикации этого, к сожалению, нет.

### III. ОШИБОЧНЫЕ ТЕЗИСЫ

*«Чтобы добраться до источника,  
надо плыть против течения»*

*С.Е. Лец [3]*

Вперемешку с правильными тезисами в публикации имеются и совершенно ошибочные тезисы.

#### 3.1. Ошибочный тезис о возможности порождения вещества из вакуума

«Сильные поля в вакууме способны «рождать» элементарные частицы, значит, все мировое пространство заполнено этим же строительным материалом» [1]. Основания для таких заявлений нет никаких. Не из каких опытов не следует, что из сильного поля можно создать материю, равно как не из каких обоснованных теорий невозможно такое предсказать. Аналогично нет никаких оснований для того, чтобы утверждать, что все мировое пространство равномерно заполнено «строительным материалом» для создания вещества. Существующие знания человечества указывают на то, что вещество заполняет мировое пространство отнюдь не равномерно. Если даже вакуум приравнять к веществу, следует признать, что это, по меньшей мере, особое вещество, которые не тождественно общепринятому понятию того, что такое вещество, а именно – атомы и элементарные частицы, из которых они состоят. При отсутствии атомов и элементарных частиц лучше говорить об отсутствии вещества даже в и том случае, когда в этом участке пространства имеется некоторая электромагнитная и гравитационная энергия от отдаленных источников этой энергии. Вакуум способен передавать эту энергию на расстоянии, но при этом он ничего или почти ничего не расходует на такую передачу энергии. Во всяком случае не выявлен эффект разогрева вакуума от того, что он передает электромагнитное поле или гравитационное поле. Теоретически можно выдвигать гипотезы, что таковой разогрев может иметь место, но в настоящее время не определено даже понятие температуры вакуума. Понятно, что если такое понятие когда-либо будет введено, то эта температура будет принята равной температуре абсолютного нуля по Кельвину. Но на настоящем этапе развития физических представлений говорить всерьез о температуре вакуума рано, а тем более рано и безосновательно говорить о том, что вакуум может быть превращен в вещество посредством применения к нему некоторой энергии. Даже если бы это было так, то для описания вакуума, в котором подобной энергии нет (так как нет источников такой энергии), никаким образом нельзя применять такую характеристику, что он заполнен «строительным материалом», из

которого можно создать вещество в его традиционном понимании. Итак, данное утверждение ошибочно.

#### 3.2. Ошибочный тезис о том, что эфир – вязкий и сжимаемый газ

Также автор утверждает, что «эфир – это реальный, т.е. вязкий и сжимаемый газ, на который распространяются все известные законы газовой динамики» [1]. Нет никаких оснований для такого категорического заявления. Следует ограничиться утверждением, что светонесущая среда, ответственная за распространение электромагнитного поля (в частности, света) и гравитационного поля, существует объективно везде (с этим, кстати, соглашался и сам Эйнштейн, он отрицал лишь объективное существование какой-либо конкретной скорости этой среды). Можно в этом случае поспорить с Эйнштейном и указать, что коль скоро эта среда существует объективно, она в каждой точке пространства должна объективно «пребывать» либо в движении, либо в покое. Следовательно, для каждой ограниченной области пространства можно выбрать единственным образом такую систему отсчета, в которой эта среда в среднем будет покоиться, а во всех остальных системах отсчета она объективно не покоится, т.е. движется. Следовательно, эфирный ветер теоретически может и должен существовать, вопреки тому, что он не выявлен в некоторых экспериментах по схеме Майкельсона. Невозможность выявить это явление может быть объяснена зависимостью от него не только распространения света, но и собственно размеров интерферометра, что не учел Майкельсон в своей трактовке этого опыта (хотя Лоренц такие соображения высказывал). Следовательно, не было веских оснований отказа от существования эфира, следовательно, его необходимо вернуть в теоретическую физику. Но все-таки это не газ, и он не обязан подчиняться всем законам газовой динамики. Итак, с этими тезисами автора соглашаться не следует. Далее следуют без ссылок на источник утверждения о новом научном направлении «эфиродинамика», говорится о содержании энергии в эфире и прочее – с этим никак невозможно согласиться, тем более, без оснований и без ссылок на источники подобных чрезмерно далеко идущих утверждений.

В первой части книги дается нелестная характеристика семейной жизни Эйнштейна, утверждается, что его первая и самая известная статья написана не им одним, а в соавторстве с его первой женой и так далее. Этический портрет какого-либо ученого, разумеется, важен для его исторической оценки, но для физики как науки он не имеет никакой ценности. Допустим, что первооткрыватель некоторой известной математической теоремы

звался вовсе не тем именем, чье имя носит эта теорема. Можно даже предположить, что он был нравственным ничтожеством, это ничего не меняет в вопросе о том, истина эта теорема, или нет. Нравственную сторону этого должны разбирать специалисты по этике, но лишь при условии наличия достаточно доказательных сведений обо всей совокупности фактов, связанных с авторством. Если же фактов нет, или их недостаточно, то и говорить не о чем. А вот вопрос истинности или ложности той или иной теоремы относится именно к той области науки, в которой эта теорема сформулирована и используется. И вопросы этой истинности решаются именно методами этой науки. Бессмысленно было бы говорить: «Теорема Пифагора ошибочна, поскольку Пифагор не имеет к ней никакого отношения, эту теорему сформулировала его жена». Наука использует доказательства, основанные на инструментарию этой науки. Математически доказанная теорема верна, а математически опровергнутая теорема не верна. Великая теорема Ферма была сформулирована ее автором без доказательств. Некоторые математики считали, что сам Ферма не имел ее доказательств (при этом некоторые считали, что теорема верна, другие считали, что теорема ошибочна), другие считали, что он такими доказательствами располагал. Теперь эта теорема доказана. Из этого можно твердо заключить, что она справедлива, но из этого невозможно установить, располагал ли доказательствами сам Ферма, или он просто угадал истинность своего утверждения. Может быть и такое, что он обладал некоторым ошибочным доказательством, ошибку в котором не заметил, однако эта теорема верна, и в этом ее основная ценность. Ее можно использовать.

В этом смысле ни авторство теории относительности, ни национальность ее автора (или многих авторов) не имеет для физики решительно никакого значения. Важно лишь одно: правильна эта теория, или ошибочна. Авторство невозможно установить методами физики, правильность или ошибочность не только возможно, но и необходимо установить и только методами физики.

### **3.3. Ошибочный тезис о том, что свет (электромагнитное поле) является особой формой материи**

Автор работы ошибочно пишет: «То обстоятельство, что свет (электромагнитное поле) и вещество представляют собой две различные формы материи, с особой отчетливостью проявляется в превращениях кванта света в пару электрон – позитрон и, обратно, в образовании светового кванта за счет объединения позитрона и электрона» [1].

Начать с того, что если электрон разогнать в ускорителе до сверхсветовой скорости, то он будет проявлять себя так, как будто бы

столкнулись электрон и антиэлектрон (позитрон), после чего они оба исчезли, а от точки их встречи распространялось световое излучение. Это явление ошибочно истолковывается следующим образом: якобы достаточно разогнать электрон до околосветовой скорости, как неизвестно откуда возникнет позитрон, который встретится с электроном, и они полностью уничтожат друг друга. Из этой ошибки родится следующая ошибочная трактовка, якобы у экспериментаторов имелся и электрон, и позитрон, и они направили их друг на друга, чтобы наблюдать их взаимное уничтожение. Полное торжество науки и техники? Но ведь у экспериментаторов не было никакого позитрона!

Что было на самом деле, так это один электрон, который удалось разогнать до такой скорости, что он попросту вырвался из поля восприятия какими-либо приборами, оставив после себя след как от позитрона.

Утверждение о том, что электрон и позитрон удалось полностью преобразовать в световую вспышку – это миф. Никто не брал и не использовал никакого позитрона, нигде его не было, не хранился он ни в каких запасниках. Электрон был устранен из сфер наблюдения, так как его скорость стала столь большой, что он уже далее не воспринимается, как отрицательно заряженная частица.

Но откуда взялось обратное утверждение? Поскольку за позитрон принимают сверхсветовой электрон, то если такой сверхсветовой электрон затормозить, то эффект будет таким, как будто бы возникла пара «позитрон + электрон». В частности, торможение может быть в веществе.

Итак, ускоритель электронов преобразует досветовую скорость электрона в сверхсветовую. Это создает эффект восприятия такого события, как уничтожение этого электрона от встречи с позитроном. Замедлитель электронов преобразует сверхсветовую скорость электронов в досветовую. Это создает эффект восприятия такого события, как порождение пары электрона и позитрона. Для торможения вовсе не нужна энергия. Следовательно, ошибочно утверждение о том, что свет преобразуется в вещество. Такого никто не наблюдал, доказать, что такое явление зафиксировано, никто не сможет.

Соответственно, совершенно ошибочно утверждение автора: «Электромагнитное поле, и в частности свет, является само по себе особой формой материи, имеющей не только много сходных черт, но и характерных различий с веществом в обычном смысле слова (электронами, позитронами, нейтронами, атомами и пр.) и не нуждается для своего истолкования в представлении об эфире» [1]. Это заблуждение. По представлениям авторов свет распро-

страняется за счет среды, которая создается им же самим.

### 3.4. О различном течении времени в разных системах

Автор, очевидно, согласен, что в разных системах отсчета время течет по-разному. В частности, на стр. 113 цитируется Лоренц: «В равномерно движущейся системе можно использовать собственный масштаб времени». Далее автор пишет: «Всякая система имеет свое время. Для пересчета времени одной системы на время другой он создал уравнения, которые получили названия преобразований Лоренца». Следовательно, автор с этим согласен. Но если с этим согласиться, то придется соглашаться и со всей теорией относительности, ведь это утверждение – следствие этой теории и неотъемлемая ее часть.

## IV. ОШИБОЧНЫЕ ВЗГЛЯДЫ ДОКТОРА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

### 4.1. Ошибка в трактовке сути опыта Майкельсона

Доктор физико-математических наук, казалось бы, должен знать, в чем суть опыта Майкельсона (или Майкельсона-Морли), в чем его проблематика. Посмотрим, как он формулирует эту суть.

«Когда говорят об «эфирном ветре», имеют в виду следующее: Земля при движении по орбите со скоростью примерно 30 км/с перемещается относительно системы удаленных звезд (следовательно, относительно эфира), неподвижный эфир полностью или частично должен вовлекаться в движение при вращении Земли. Тогда скорость света, излученного в направлении вращения Земли, должна уменьшиться, а в обратном направлении – увеличиться. Это явление и получило название «эфирного ветра».

Автор очень далек от истинной сути этого эксперимента и связанного с ним явления.

Во-первых, в трактовке автора эфирный ветер – это движение эфира. Тут он глубоко ошибается. В общепринятой трактовке эфирный ветер – это как раз отсутствие движения эфира при условии, что Земля достоверно движется, а, следовательно, Земля движется относительно эфира, а эфир движется относительно Земли. Так что эфирный ветер – это не вовлечение эфира во вращение, а как раз наоборот – отсутствие такого вовлечения. Если бы такое вовлечение было доказано, то это бы объясняло и отрицательный результат опыта Майкельсона, и фактическую возможность существования эфира. Как раз одна из теорий для объяснения опыта Майкельсона использовала гипотезу о вовлечении эфира. Вовлечение – не есть ветер, это отсутствие ветра. Не вовлечение – это ветер.

Доктору физико-математических наук подобная путаница в понятиях непростительна.

Во-вторых, скорость движения Земли относительно Солнца в десятки раз меньше скорости движения ее вместе с Солнцем. Поэтому если уж эфирный ветер существует, основная его компонента вызвана отнюдь не движением Земли. Разумеется, вращение Земли изменяет ее ориентацию, следовательно, при разных ее положениях можно ожидать, что величина эфирного ветра должна быть разной. То есть отыскание эфирного ветра и эффектов от него неизбежно связано с вращением Земли, но сам эфирный ветер должен возникать не столько от вращения Земли, сколько от движения ее совместно с Солнцем. Это как минимум, ведь речь идет о скорости Солнца относительно нашей галактики. Возможно, что и вся галактика движется, и намного быстрее. Опять доктор физико-математических наук проявил некомпетентность.

В-третьих, во времена Майкельсона, возможно, позволительно было думать, что твердые тела имеют размеры, не зависящие от скорости распространения электромагнитного поля. Хотя и в его времена надо было бы уже усомниться в таких предположениях, ибо уже было известно, что вещество состоит из атомов. Но в наше-то время достоверно известно, что вещество состоит из атомов, и что размеры атомов намного меньше, чем размеры пустого пространства между ними. И что расстояния между атомами определяются равновесием сил. И что эти силы имеют электромагнитную и гравитационную природу. Также должно быть очевидно всякому мыслящему человеку, не обязательно доктору или кандидату наук, а просто изучившему физику хотя бы в школьном объеме, что если силы, удерживающие атомы в тех местах, где они удерживаются, образуя кристаллические решетки всех твердых тел, взаимодействуют не мгновенно, а с конечной скоростью, и что если эта скорость зависит от скорости этого тела относительно носителя полей, передающих эти силовые воздействия, то естественно предположить, что положения атомов отнюдь не инвариантны к движению тела в этой среде. Попросту говоря, если взаимодействия полей отвечают за размеры твердых тел, и если скорости взаимодействия полей зависят от скорости движения этих тел относительно среды, то и размеры этих тел должны зависеть от движения этих тел относительно среды.

Еще проще – если интерферометр перемещать в эфире, то размеры интерферометра зависят от скорости его движения в эфире. Поэтому интерферометр не является достоверной мерой длины, если он движется в эфире. Этим и только этим объясняется отрицательный результат опыта Майкельсона.

Эйнштейн этого не смог понять, как не понял этого Майкельсон, Ритц и все последующие толкователи этого опыта, (только Лоренц догадался, но отказался от своей догадки).

Если бы они это поняли, то они бы поняли и то, что нет никаких оснований для создания и принятия теории относительности. Все на деле гораздо проще, чем это представлено в этой противоречивой и ошибочной теории.

#### 4.2. Действие сил инерции в инерциальных системах

Автор, который является доктором физико-математических наук, пишет «Если в различных инерциальных (где действуют силы инерции – В.Б.) системах координат мы будем производить одни и те же механические опыты, то эти опыты во всех случаях дадут один и тот же результат» [1, стр.112].

Т.е. автор сам вносит уточнение к термину «инерциальная система», разъясняя, что это – такая система, где действуют силы инерции.

Сил инерции в природе не существует, и доктор физико-математических наук должен об этом знать. Инерциальной системой называется система, которая покоится, либо движется равномерно прямолинейно. Таких систем в природе также нет, это чистая абстракция. Если предположить такую систему, то надо предположить отсутствие гравитационного поля, поскольку при его присутствии никакое тело не будет двигаться равномерно прямолинейно «в отсутствие внешних сил», так как гравитационное поле и есть либо внешняя сила, либо внутренняя. Сила инерции – это виртуальная сила, которую можно использовать при переходе из инерциальной системы в другую, внутреннюю по отношению к ней систему, которая привязана к объекту, движущемуся с ускорением. Использование такой силы позволяет виртуально продемонстрировать, куда будут увлекаться тела, обладающие массой, вследствие того, что они стремились бы продолжать свое движение без ускорений, тогда как сама система все же движется с ускорением. Например, когда автобус тормозит, его пассажиры увлекаются вперед, так как инерция их масс стремится продолжить их поступательное движение. Если рассматривать их движение в системе, связанной с дорогой, то их прямолинейное движение претерпевает торможение вследствие действия сил трения пола или кресел, оказываемых на пассажиров такое действие, которое их тормозит. Т.е. имеется сила трения, но нет никакой силы инерции, инерциальной силы. Если же теперь перейти к рассмотрению, что почувствуют пассажиры внутри автобуса, которые не смотрят в окна и считают автобус неподвижным, стационарным, то получится, что некая сила вдруг неожиданно увлекла их вперед. Эта сила действует в не

инерциальной системе отсчета, и это принципиально. Как же доктор физико-математических наук может столь серьезно заблуждаться? Или он не смог достаточно корректно сформулировать свой взгляд, отчего его взгляд сформулирован явно некорректно, ошибочно.

#### 4.3. О противоречиях, снятых квантовой теорией

Автор работы [1] понимает, безусловно, что в утверждении о том, что энергия может превращаться в вещество, а вещество в энергию, не все просто и понятно. Но, не увидев, что в этом утверждении все принятые в теории положения крайне далеки от того, чем действительность является, он лишь признает существование некоторых трудностей в этом вопросе, которые, якобы полностью сняты квантовой теорией. «Эта теория устранила затруднения в вопросах излучения света нагретыми телами: она по-новому заявила о проблеме взаимодействия света и вещества, понимание которого было невозможно без квантовой интерпретации». Здесь автор не понимает, что квантовая теория столь же абсурдна, как и теория относительности, и одна из причин этого – принятие теории относительности к тому времени, когда принималась квантовая теория. Вторая причина – это поддержка этой теории Эйнштейном, хотя он и не был ее автором. Хотя во всех остальных отношениях и смыслах автор ругает не только теорию Эйнштейна, но и все, что с ним связано, и что от него исходит, в данном случае он квантовую теорию не ругает, хотя ее победа, безусловно, связана с поддержкой ее Эйнштейном. И это при всем том, что квантовая теория принципиально непримирима с теорией относительности. Действительно, если в теории относительности скорость движения частиц не может быть больше, чем скорость света в вакууме, из этого явно следует, что такая частица не может «мгновенно», т.е. буквально за нулевое время переходить с одной орбиты на другую. Но квантовая теория требует именно этого, поскольку, согласно этой теории, если бы электрон переходил с одной орбиты на другую постепенно, это означало бы, что его энергия также изменяется постепенно, что квантовая теория отрицает принципиально. Стоит предположить, что энергия электрона может плавно изменяться, это уже будет несоответствием квантовой теории света (и не только, а всех вообще видов энергии). Кроме того, квантовая теория противоречит и сути понятия о «квантах» как о чем-то фиксированном и неизменным. Коль скоро квант равен произведению частоты на константу, и коль скоро частота может изменяться непрерывно, то, следовательно, и энергия кванта может изменяться непрерывно. Здесь сразу два противоречия: первое – что она вообще может изменяться,

второе – что эти изменения могут быть непрерывными, не дискретными. Утверждение о том, что частица – квант – может иметь любую энергию, столь же абсурдна, как утверждение о том, что электрон может иметь любую массу. И, кстати, именно это утверждение следует из теории относительности, поскольку масса электрона, согласно этой теории, зависит от его скорости, следовательно, она может и даже должна постоянно изменяться в ходе его движения. Ну а поскольку скорость электрона – понятие не объективное, отличающееся в разных системах, то, следовательно, и масса электрона также не является фиксированной, а отличается в зависимости от выбора системы отсчета. Если автор книги [1] со всем этим согласен, то тогда не понятно, зачем вообще он предпринял попытку критиковать теорию относительности, ведь сам-то он, как выясняется, в значительной мере подвержен влиянию этой теории, и разделяет львиную долю ее ошибок, а также ошибки смежной теории. Зачем же ругать то, с чем соглашаешься, или зачем соглашаться с тем, что ругаешь?

Далее там же автор пишет: «Целый ряд оптических явлений, в частности, фотоэлектрический эффект и вопросы рассеяния света, выдвинул на первый план корпускулярные особенности света». Это также ошибка, о чем сказано в другом месте.

#### 4.4. О понятии мгновенной скорости

Автор цитирует книгу В.Н. Матвеева [5], где сделана попытка дать физическую интерпретацию теории относительности. Хотя с этой книгой во многом можно и нужно поспорить, все же автор ошибается, когда критикует ее за ввод понятия «мгновенной скорости», утверждая, что это лишено смысла при постоянстве скорости движения. С таким же успехом можно было бы утверждать, что понятие массы тела лишено смысла при постоянстве этой величины. Мгновенная скорость – это производная от перемещения по времени. Это может быть векторная величина, или скалярная, в зависимости от модели движения. При движении вдоль оси достаточно будет скалярной величины. Но почему же мгновенная скорость лишена смысла? Если требуется обсудить, как она изменяется во времени, то следует рассматривать эту функцию, и если функция является константой, это еще не лишает ее смысла.

#### 4.5. Свет и его дуальная природа

Автор цитирует академика Г.С. Ландсберга: «Мы не имеем права отождествлять свет и вещество: это два различных вида, две различные формы материи. ... В явлениях фотоэффекта есть черты, говорящие в пользу классических волновых представлений о свете»

[25]. Цитируется верное утверждение, но автор, похоже, с ним не согласен (см. выше).

### V. УТВЕРЖДЕНИЯ АВТОРА БЕЗ ССЫЛОК И СО ССЫЛКАМИ НА ИСТОЧНИКИ

Также в работе [1] встречаются утверждения, которые не подтверждены ссылками на литературу. Достоверность этих утверждений не ясна. В некоторых случаях суть утверждений настолько важна, что просто необходимо было бы указать источник этих сведений, так как подобные утверждения, если они справедливы, кардинально могут изменить оценку тех или иных фактов. Не будем цитировать и тем более обсуждать утверждения, касающиеся личной жизни или высказываний научных деятелей или иных не важных для науки заявлений. Остановимся лишь на важных.

#### 5.1. О различных результатах при измерении скорости света

«Возвращаясь же к эксперименту Майкельсона, следует отметить, что им была зафиксирована разница в измеренной величине скорости света в одном и другом направлениях на уровне 3-4 км/с. Майкельсон отнес это к погрешностям измерений и сделал вывод об ошибочности гипотезы стационарного эфира» [1, с.111].

Отметим, что Майкельсон ставил различные эксперименты. Один из них – это определение скорости света. Другой – выявление эфирного ветра. Этот второй эксперимент чаще всего называется опытом Майкельсона, а установка для этого опыта называется интерферометром Майкельсона. Во втором эксперименте не измерялась скорость света, поэтому данное утверждение не может относиться ко второму эксперименту. Но в первом эксперименте не проверялась гипотеза стационарного эфира, поэтому по результатам первого эксперимента Майкельсон не мог делать таких выводов.

Автор этой статьи располагает двумя редкими изданиями книг Майкельсона [17, 18], причем одна из них написана тогда, когда Майкельсон еще не знал о теории относительности и не мог упоминать ее в качестве объяснения отрицательного результата своего опыта [17]. В этой работе он пишет, что интерферометр специально изобретен для того, чтобы измерить скорость Земли по отношению к эфиру. При этом он уже указывал, что речь идет не только о скорости Земли относительно Солнца, но и скорости Земли вместе с Солнцем: «По различным веским причинам полагают, что солнце, а за ним и все планеты движутся в определенном направлении через пространство со скоростью примерно 30 км. в секунду. Эта скорость не вполне точно определена, и я надеялся, что при помощи этого опыта мы будем иметь возможность измерить скорость движения всей солнечной системы в прост-

ранстве. Но так как результат опыта оказался отрицательным, то эта задача еще ждет своего решения» [17, стр.174]. Как видим, Майкельсон не утверждает при этом, что теория эфира должна быть отброшена, он лишь утверждает, что поставленная задача не была решена. То есть в этом случае нельзя приписать Майкельсону то мнение или утверждение, что скорость света во всех направлениях (при измерении относительно Земли) обязательно должна быть равна. Напротив, если бы он такой результат получил, то он бы поспешил его обнародовать как доказательство того, что ему удалось выявить эффект эфирного времени. Но опыт по измерению скорости света Майкельсон ставил намного раньше. В этой книге Майкельсон лишь два раза упоминает скорость света, на страницах 8 и 162. Первое упоминание связано с соотношением между скоростью и длиной волны, во втором случае сообщается значение скорости света, но не обсуждается никакой эксперимент, который позволил ее измерить.

В другой более поздней книге скорости света посвящен целый параграф, который так и называется. Сказано, что первым скорость света измерил Рёмер в 1675 г, который по наблюдению затмений первого спутника Юпитера сделал вывод, что интервал повторения этих затмений изменяется с периодом, равным земному году [18, с.136]. Затмения запаздывали на 16 минут 26 секунд (в сноске сказано, что Рёмер эту величину оценил в 22 минуты), из этого следует, что скорость света равна 300 000 км/сек. Другой метод принадлежит Брадлею, который использовал в 1728 г. явление абберации звезд для вычисления скорости света. В 1849 г. Физо опубликовал результаты своего опыта, в котором «результат получился на 5% больше истинного» [18, с.137]. Далее Майкельсон приводит историю последующих измерений и их результаты. Здесь важно посмотреть на метод измерения. На стр. 138 приведена схема измерения скорости света. Свет проходит между зубьями зубчатого колеса, далее распространяется до зеркала и идет обратно, снова проходит между зубьями этого колеса, после чего идет к наблюдателю. Если колесо вращается и прерывает путь луча. Возвратившийся свет наталкивается на зуб колеса и не виден. Но если он возвратится тогда, когда в этом месте будет новый паз между зубцами, то свет будет виден. Если скорость вращения колеса изменять, то при совпадении времени поворота колеса на величину целого шага зубцов со временем **распространения света по замкнутой траектории от колеса к зеркалу и обратно**, свечение на выходе оптической схемы будет максимальным. Это позволяет определить **среднюю скорость света на пути от колеса к зеркалу и обратно**. В этом опыте нет никакой возможности определить скорость света только в одном направлении. Далее на стр. 140 описан

другой опыт, в котором также измеряется время прохождения светом замкнутого пути, как пишет сам Майкельсон, «принципиальной разницы между двумя методами нет». В этом опыте также измеряется средняя скорость света на замкнутой траектории.

Далее приводятся результаты самых последних для того времени измерений, которые производились в воздухе между горой Вильсон и горой Сан-Антонио близ Пасадены, расстояние между которыми равно 35 км. В этой схеме свет также идет по замкнутой траектории. Измерения осуществлялись с различными зеркалами – в форме призмы с 8-угольным основанием, а также с 12-угольным и 16-угольным основанием. Измерения, естественно, производились с разными скоростями вращения этих зеркал. Полученные результаты отличаются лишь в шестом знаке, т.е. изменяются от 299 795 до 299 797 км/с. Естественно, что Майкельсон дал результат в виде  $299\,796 \pm 1$  км/с, иначе и быть не могло. Далее Майкельсон приводит результаты между двумя различными наблюдательными пунктами, которые изменяются от 299 800 до 299 990 км/с. Здесь результат отличается отнюдь не на 3–4 км/с, а на 190 км/с. Во всех рассмотренных случаях измерялась средняя скорость света на замкнутом пути. Ни в каком из указанных случаев нет никакой возможности экспериментально отличить скорость света на противоположных направлениях.

В этой же книге сообщается об истинном результате опыта Майкельсона. А именно: «Можно считать, что опыт не дает смещения больше чем на 0,01 полосы. Если рассматривать движение земли только по ее орбите, мы вправе

ожидать смещения, равного  $\frac{2Dv^2}{\lambda V^2}$ . Расстояние

$D$  было около 11 м или  $2 \times 10^7$  длин волн желтого света, при  $\frac{v}{V} = \frac{1}{10000}$ , это дает для

ожидаемого смещения 0,4 полосы. Наблюдаемое же смещение, во всяком случае, меньше чем одна двадцатая этой величины и, вероятно, меньше одной сороковой. В предшествующем мы рассматривали только орбитальное движение земли. Не может ли быть, что оно случайно как раз нейтрализует влияние движения системы в пространстве. Опыты были вновь повторены Морли и Миллером с значительно большим прибором; две серии наблюдений повторно привели к отрицательному результату» [18, с.167–168].

К сказанному имеется очень интересный комментарий: «Недавний опыт Дайтона Миллера, казалось, привел к положительному результату, дав небольшую долю (одну тридцатую) предполагаемой скорости галактической системы (300 км в секунду). Но такой результат

противоречит принципу относительности. В настоящее время идет подготовка к дальнейшей проверке результатов» [18, с.168].

Итак, с чем же мы имеем дело, разберемся. С одной стороны, теория относительности утверждает, что она дает объяснение отрицательному результату опыта Майкельсона. С другой стороны, когда в опыте Майкельсона был получен все-таки положительный результат, он был признан ошибочным, поскольку он противоречит принципу относительности, который взят из теории относительности. Тем самым получается, что после того, как ранее полученный отрицательный результат был использован для создания теории, которая категорически отрицает возможность получения положительного результата, то далее уже не эксперимент стал диктовать направление развития физики, а теория стала диктовать, что в эксперименте считать достоверным, а что в нем считать ошибочным или недостоверным.

Но откуда, собственно, известно, что скорость галактики в 30 раз выше, чем та, которая получается в результате ее измерения с помощью интерферометра Майкельсона? Только лишь из чисто гипотетических представлений, а именно: вследствие трактовки эффекта Хаббла. А почему эффект Хаббла трактуется так, а не иначе? Именно потому, что теория относительности утверждает, что иначе быть не может, что свет не может изменять свою скорость. А почему физики верят теории относительности? Именно потому, что она объясняет, почему опыт с интерферометром Майкельсона дает отрицательный результат. Но почему же считается, что опыт Майкельсона дает отрицательный результат, если он на самом деле положительный? Потому, что ожидали эффект в тридцать раз больший, поскольку такое вытекает из теории относительности!

Действительно, «Эффект Доплера помогает определить, что наша Солнечная система движется относительно реликтового излучения со скоростью  $368 \pm 2$  км/с, а местная группа галактик, включающая Млечный Путь, галактику Андромеды и галактику Треугольника, движется со скоростью  $627 \pm 22$  км/с относительно реликтового излучения» [22]. То есть «научное» утверждение о том, что Земля совместно с Солнцем и совместно с галактикой «Млечный путь» движется со скоростью более 360 км/с основано только лишь на эффекте Хаббла, а эффект Хаббла трактуется как следствие скорости «разбегания» галактик и звезд только вследствие ошибочного принятия теории относительности как верной теории. **Если бы теорию относительности не признали верной, то эффект Хаббла, вероятнее всего, объяснили бы дисперсией света.** Но в этом случае вероятнее всего указанная выше чрезвычайно большая скорость

движения не была бы приписана Земле. Следовательно, **нет достаточно веских оснований для того, чтобы усомниться в наличии положительного результата опыта Майкельсона**, так как он действительно положительный, если считать, что истинная скорость движения Земли в 30 раз меньше, чем та, на которую указывают ученые, объясняющие эффект Хаббла движением звезд, а не дисперсией света.

**Имеем замкнутый круг в доказательствах:** «Теория относительности верна, поскольку она верна». Тем, кто не понял, поясню. «Теория относительности верна, поскольку опыт Майкельсона дал отрицательный результат, который на самом деле положительный, но он не соответствует тому, что мы ожидали на основе теории относительности, поэтому мы его считаем отрицательным».

Если Майкельсон поставил целью своего опыта определение истинной скорости Земли относительно эфира, то он должен был настаивать, что результаты его эксперимента дают фактическое значение, которое в 30 раз меньше общепринятого. Далее следовало бы пересмотреть всю совокупность теоретических трактовок (не отрицая никаких экспериментальные результаты), чтобы увязать их все воедино в такую теорию, которая бы убедительно объясняла все известные экспериментальные сведения.

Если опыт Майкельсона дал результат в 30 раз меньше ожидаемого, то, следовательно, имеются причины для того, чтобы этот опыт не дал то значение, которое ожидалось.

Можно выдвигать следующие гипотезы:

1. Можно предположить, что **размеры плеч интерферометра отнюдь не инвариантны к движению лаборатории сквозь эфир.** Это может объяснить не только малое значение ожидаемого результата, но и полное отсутствие результата, то есть отрицательный результат. Но это объяснение может также быть применено мене жестко, то есть всего лишь послужить объяснением того, что ожидаемый результат не совпал с фактическим. Т.е. можно предположить, как вариант, что эфирный ветер на самом деле найден, но **изменения размеров интерферометра снизили этот эффект в 30 раз.**

2. Можно предположить, что **фактическая скорость Земли в 30 раз меньше ожидаемой**, и, следовательно, **необходимо пересмотреть теорию**, согласно которой скорость Земли считается выше, чем та, которая измерена экспериментально.

3. Можно предположить, что факторы, указанные в предыдущих двух пунктах, действуют совместно и дают тот суммарный эффект, который был получен.

По данному вопросу можно подытожить, что не помешала бы достоверная цитата к

утверждению автора работы [1], равно как не помешало бы физическому сообществу пересмотреть основания для того, чтобы считать результаты опыта Майкельсона отрицательными, и, разумеется, пересмотреть эти результаты как основание для принятия теории относительности за истинную теорию.

## 5.2. Об эфирном ветре со ссылкой на источник

Автор работы [1] ссылается на работу В.А. Ацюковского «Эфирный ветер» [19], цитируя следующее: «Эфирный ветер был обнаружен, значение его скорости и направление были определены с неплохой для своего времени точностью. Оказалось, что направление этого ветра вовсе не совпадает с направлением движения Земли, как предполагалось вначале, а почти перпендикулярно к нему... И хотя Миллером... эксперименты уже были проведены, учитывая всю сложность обстановки, нужно сейчас, с использованием существующих измерительных средств и современных возможностей вернуться к этому вопросу и провести соответствующие эксперименты вновь».

Также сказано, что подобный эксперимент выполнен Ю.М. Галаевым [20] с цитированием этой работы: «Значение скорости эфирного ветра, измеренное в настоящей работе в диапазоне радиоволн, близко к значениям эфирного ветра, измеренным в оптическом диапазоне электромагнитных волн в экспериментах Миллера, Майкельсона, Пирса, Пирсона...» Таким образом, результаты выполненного эксперимента согласуются с положениями исходной гипотезы о существовании в природе материальной среды эфира» [20], цитируется по [1].

Также кажется уместной далее цитата из Эйнштейна: «Общая теория относительности наделяет пространство физическими свойствами, таким образом, в этом смысле эфир существует. Согласно общей теории относительности, пространство немислимо без эфира». Но цитата не полна. Далее Эйнштейн пишет, что этому эфиру нельзя приписать никакую конкретную скорость: «Однако этот эфир нельзя представить себе состоящим из проследживаемых во времени частей; таким свойством обладает только весомая материя; точно так же к нему нельзя применять понятие движения» [21]. Если признать эфир, но не признать за ним понятия движения, то эфир не может считаться носителем волны, следовательно, это ничем не лучше, чем отказ от эфира. Если нечто не движется и не взаимодействует ни с чем, то это «нечто» не может быть выявлено ни в каких экспериментах. Следовательно, гипотеза о существовании этого бессмысленна. Такое «нечто» есть «ничто».

## 5.3. Что важнее – теория или практика?

Приводится цитирование Эйнштейна: «Именно теория решает, что мы наблюдаем» [1, стр. 131]. Там же сказано, что Эйнштейн настаивал, что экспериментом «невозможно проверить все». Далее приведены высказывания Анри Пуанкаре: «Научный метод заключается в наблюдении и экспериментировании... Во всех опытных науках необходимо считаться с ошибками, обусловленными несовершенством наших чувств и наших инструментов». Это важно. Если исходить из того, что наши методы измерений всегда дают нам представления о действительности с некоторой погрешностью, это позволит примирить теорию и практику. Действительно, если движущаяся лаборатория не может выявить своего движения, это всего лишь недостаток метода выявления. Возможно, имеются другие методы, которыми мы пока не овладели. У Эйнштейна принципиально иной подход: если измерить не удастся, значит, этого нет. Если разницу между покоем и равномерным прямолинейным движением мы не можем определить (сегодня при сегодняшних технологиях и на ограниченной базе придуманных сегодня экспериментов), значит, эти системы принципиально не отличаются, они одинаковы, и далее нечего рассуждать на тему того, как можно их отличить.

Но вот возник метод: заполните интерферометр прозрачным веществом. Вот вам метод проверки теории относительности. Если интерференционные полосы не стронутся с места при движении такого интерферометра, это разбивает все аргументы против эфира. Действительно, ведь среда достоверно покоится лишь в единственной системе отсчета, а в других она движется. А именно: мы можем привязать систему отсчета непосредственно к среде. Мы можем указать, что скорость света равна скорости движения его в этой среде только в этой системе отсчета. В любой другой системе отсчета скорость света будет достоверно иной, что доказано опытом Физо. Следовательно, отсутствие смещения полос можно объяснить лишь тем, что и размеры интерферометра изменяются. Но, следовательно, и эфир напрасно был объявлен несуществующим, за ним «нет никакой вины». Следовательно, один из постулатов теории относительности ошибочен. Если же интерферометрические полосы при таком движении будут перемещаться (конечно, этого не будет, но все же), тогда придется признать, что мы получили прибор, с помощью которого мы можем отличить абсолютный покой от абсолютного движения. Следовательно, другой постулат теории относительности будет опровергнут. Само существование такого прибора обязательно опровергает один из двух постулатов теории относительности. А их всего

лишь два. Следовательно, теория относительности в любом случае ошибочна. Любопытно, что такой опыт был предложен, однако, он не был поставлен, поскольку якобы он слишком дорого стоит. Хотелось бы узнать, что дорогого в этом опыте. Также хотелось бы понять, как можно продолжать считать теорию истинной, если существует такой опыт, который вне зависимости от его результата противоречит фундаментальным основам этой теории, то есть опровергает ее в самом своем основании.

## VI. НЕЗАКОНЧЕННЫЕ МЫСЛИ, ПОЛОЖЕНИЯ, ЦИТАТЫ

### 6.1. Об электроне, обгоняющем свет

Мысли и цитаты о том, что электрон может двигаться в среде со скоростью, большей, чем скорость света в этой среде – это, разумеется, уместно и относится к теме. Также уместны ссылки на то, что в этом случае имеет место эффект Черенкова, т.е. электрон излучает. Но эта мысль не закончена. Тем более что сама эта мысль и сами эти факты известны. Да, известно, что электрон излучает, когда движется в среде быстрее, чем свет может двигаться в этой среде. От этого – полшага до того, чтобы объяснить причину этого явления, как это было сделано ранее нами [8–16]. Действительно, электрон, двигаясь со скоростью, большей, чем скорость света, ощущает торможение со стороны собственного электромагнитного поля, которое порождается его движением. Опережая свою собственную волну электрического поля, он ощущает ее так, как если бы за ним сзади двигался такой же электрон, но положительно заряженный. Электрон, движущийся медленнее, чем скорость света, является «негатроном» (т.е. отрицательно заряженным электроном), движущимся в собственном поле, в поле «негатрона». Но электрон, движущийся быстрее скорости света, ощущает собственное поле, как поле «позитрона», а это поле ощущает этот электрон как «позитрон». В данном случае «позитрон» - это временная «дырка» в среде, недостаток электрона, что дает положительный заряд. Это двойная ошибка восприятия приводит к тому, что «негатрон» идет на сближение со своим собственным отстающим прообразом, виртуальным «позитроном», а виртуальный «позитрон» идет на сближение с этим «негатроном». Это сближение происходит с колебаниями, что и порождает высокочастотный всплеск электромагнитного излучения. Это излучение света уносит лишнюю энергию электрона, после чего он уже движется со скоростью, меньшей, чем скорость света в этой среде, или равной ей. Этот вывод следовало бы сделать, а также распространить его и на ситуацию в вакууме – электрон и там может и должен излучать свет и терять энергию, его скорость становится равной скорости света или

меньшей, чем эта скорость. Этот эффект в вакууме не известен, но он обязательно будет обнаружен. Тогда его, вероятнее всего, назовут эффектом Черенкова для вакуума, хотя ни Черенков, ни другие физики пока его не предсказали.

### 6.2. Об отклонении света вблизи Солнца

Со ссылкой на книгу В.И. Секерина, автор говорит, что свет вблизи Солнца должен отклоняться вследствие наличия около него солнечной короны [6]. Здесь вслед за Секериным упор делается на ту часть атмосферы Солнца, которая светится. Это ошибка, хотя и не очень важная. Действительно, около Солнца имеются плотные газы, а короной называются выбросы плазмы с ее поверхности. Если мы говорим о светящейся короне как о причине отклонения света звезд, то наши оппоненты, сторонники теории относительности, легко отметут этот довод, поскольку скажут, что измерения производились в той области, где солнечная корона уже не светится. Вопрос не в том, светится она или нет, а в том, что вблизи Солнца имеется атмосфера, намного плотнее, чем атмосфера Земли. В этом и только в этом причина отклонения света звезд. Далее цитируется высказывание Вина в его юбилейной лекции от 1914 г. Там говорится о том, что искривление пути света звезд вблизи Солнца должно происходить вследствие того, что свет переносит энергию, и, следовательно, его скорость не должна быть одной и той же.

В этой связи следует отметить, что если, по мнению Эйнштейна, свет вблизи гравитационных масс отклоняется просто потому, что он к этим массам притягивается, тогда следовало бы ему и предположить, что свет, направленный к тяжелым массам непосредственно, должен при приближении к этим массам ускоряться, в при удалении от этих масс – замедляться. Следовательно, свет, который мы наблюдаем от Солнца, должен иметь красное смещение, а свет, который мы наблюдаем над головой тогда, когда Солнце находится строго под нами, должен иметь смещение в фиолетовую часть спектра. Этого нет, это следовало бы отметить в книге.

Вообще говоря, изменение угловых размеров самих звезд и углов между звездами при наблюдении с Земли весьма сильно зависит от направления наблюдения. Если звезды наблюдаются в зените, это одна ситуация, если они наблюдаются вблизи горизонта, ситуация иная. Разница этих размеров на порядок больше, чем эффект от прохождения света звезд вблизи Солнца. Причина этому – эффект линзы от атмосферы Земли. Известно, что средний видимый диаметр Солнца равен 31'59" и изменяется от 31'27" до 32'31" [[https://ru.wikipedia.org/wiki/Угловой\\_размер](https://ru.wikipedia.org/wiki/Угловой_размер)]. Т.е. изменения составляют около процента.

Если атмосфера Земли так влияет на наблюдения, что же удивительного, что на наблюдения влияет также и атмосфера Солнца, которая больше и во много раз плотнее [\[https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнце#Атмосфера Солнца\]](https://ru.wikipedia.org/wiki/Солнце#Атмосфера_Солнца)?

### 6.3. О смещении перигелия Меркурия

Далее сказано, что смещение перигелия Меркурия было открыто академиком А.Н. Крыловым без всякой теории относительности и на три года ранее опубликования статьи об этом Эйнштейном в 1915 г. Это, безусловно, важно, но достаточно открыть собственную статью Эйнштейна о смещении перигелия Меркурия, и уже из нее самой ясно, что Эйнштейн во время публикации этой статьи отнюдь не претендовал на то, чтобы приписать себе это открытие. Он претендовал лишь на то, что возможно с привлечением теории относительности будет найдена причина этого явления, а факт этого явления он упоминает как уже известный, приводит также и таблицы изменения этой величины с течением времени. Это лишь намного позднее Эйнштейн стал называть свою нелепую попытку объяснения этого факта предсказанием, сделанным на основе теории относительности. Никакого предсказания там не было. Был известный факт, данный научной общественности в таблицах для разных времен, как изменяется это положение Перигелия Меркурия во времени. Далее Эйнштейн на основе чрезвычайно общих рассуждений привел соотношение, которое имеет некоторые признаки периодических изменений. Соотношением нельзя было пользоваться, так как оно не поддавалось вычислению, при том еще, что многие входящие в него величины были не известными. Эйнштейн использовал это соотношение лишь для того, чтобы указать, что положение перигелия Меркурия может изменяться. Само значение он не вычислял. Далее его рассуждения таковы: сначала предположим, что теория относительности уже полностью объяснила тот факт, что Перигелий Меркурия смещается. У нас даже есть таблицы этих смещений. Предположим, что наше соотношение как-то связано с этим. Условно приравняем теоретические результаты к практическим. У нас нет никаких оснований для расчётов, но давайте, для начала, вычислим амплитуду этих колебаний. А для этого ограничимся первой гармоникой и из таблицы найдем, какова должна быть в этом случае амплитуда таких колебаний. Имея график колебаний, он отыскал чисто математическими методами без малейшего применения физики, амплитуду этих колебаний, а также фазу. На этом основании он смог для следующего наблюдения дать ориентировочное значение этой величины. Это лишь доказывает, что у Эйнштейна был достаточно острый ум, чтобы

отыскивать амплитуду и фазу гармонических колебаний по имеющейся таблице нескольких значений этих колебаний, с чем бы справился любой студент, безо всякой теории относительности, и даже вовсе без использования какой-либо физики или физической теории.

### 6.3. Об излучении гравитационных волн массивными объектами

Автор пишет, что существует теория, которая объясняет излучение гравитационных волн без использования теории относительности. По меньшей мере, следовало бы сообщить читателю, о каком эффекте идет речь, почему этот эффект следует объяснять, ведь на самом деле объяснять теоретически необходимо только то, что зафиксировано экспериментально. По-видимому, под этим явлением понимается излучение от «черных дыр». Было множество сообщений о том, что найдены «черные дыры», но при ближайшем рассмотрении есть лишь факты, состоящие в том, что чаще всего в центрах галактик не найдено каких-то ярких (следовательно, массивных) звездных объектов, из чего делается поспешное заключение, что там находятся «черные дыры». Если бы это было так, то следовало бы признать, что все галактики движутся к своему уничтожению, к превращению их во все более гигантские «черные дыры».

Во-первых, отсутствие объектов в центрах галактик можно объяснить, по меньшей мере, тем фактом, что эти объекты туда ничто не притягивает. Внутри полого астероида гравитация равна нулю. Аналогично внутри кольца звезд гравитация в среднем равна нулю. Иное дело в самом кольце – там она не равна нулю, именно туда и стремятся звезды. Поэтому в галактиках звезды скапливаются не в центре. По этой же причине они закручены в рукава. Каждая конкретная звезда притягивается туда, откуда исходит наибольшая гравитация, но вследствие ограниченной скорости распространения гравитационных волн этот «воспринимаемый центр масс» не совпадает с фактическим объективным центром масс, вследствие чего каждая звезда стремится не туда, где он фактически находится, а по направлению своего индивидуального вектора силы.

Во-вторых, если бы все галактики развивались именно так – с необратимым превращением в «черные дыры», вся Вселенная заполнилась бы сначала «черными дырами», затем они стали бы двигаться друг к другу, слились бы в одну такую «черную дыру», и на этом все развитие закончилось бы раз и навсегда. Поскольку мы верим, что Вселенная безгранична не только в пространстве, но и **во времени своего существования**, мы не можем согласиться с такой гипотезой. Если бы такое имело место, то, по крайней мере, первая часть этого процесса уже завершилась бы, т.е.

стягивание всей материи к отдельным «черным дырам» уже имело бы место. Времени было для этого достаточно, ведь оно бесконечно. Той ситуации, которая имеется сейчас, не могло бы быть, за вечное время все необратимые процессы уже бы совершились. Следовательно, приходится признать, что подобных необратимых процессов во Вселенной нет. «Черные дыры» не поглотили всю материю по уважительной причине: их в природе не существует.

Здесь логика проста: либо можно допустить необратимые процессы подобные образованию и росту «черных дыр», но тогда надо признать ограниченное во времени существования Вселенной, либо, если отказаться от гипотезы ограниченного во времени существования, следует признать, что эти процессы, по меньшей мере, обратимы. То есть надо признать, что если бы даже черные дыры существовали, то это не окончательная стадия существования вещества, а лишь одна из многих промежуточных (а окончательных стадий не существует). Следовательно, необходимо признать то, что «черная дыра» по мере своего разрастания движется к своему уничтожению. То есть необходимо признать, что увеличение массы астрономического тела приближает его распад. Но при таком признании оказывается, что черные дыры не обязательно существуют, ведь допущение о том, что они существуют именно основано на том, что процесс накопления массы ничем не ограничен. Это допущение попросту было рассмотрено чисто умозрительно на предмет теоретизирований (ни на чем существенном не основанных) на тему: что будет, если масса астрономического тела будет неограниченно возрастать, и этому процессу ничто не будет препятствовать. Следовательно, допустив, что процесс накопления массы все же ограничен (так как трудно допустить, что время существования Вселенной ограничено), мы устраняем исходную предпосылку для допущения существования «черных дыр».

Нам могут возразить, что черные дыры фактически уже открыты, занесены на карту звездного неба, определены их координаты, о них написаны научные статьи. Это все лишь допущения, все эти открытия чисто умозрительны. Наблюдаются некоторые видимые астрономические объекты, по спектрам их смещений делаются выводы об их движении, по виду движения делаются предположения о величинах ускорений этих звезд. На самом деле измерять ускорения небесных тел астрономы не умеют, научно обоснованной методики для этого не существует. И вот по таким спорным выводам об ускорениях небесных тел делаются выводы о силах, их породивших. Эти силы и объясняются таинственной «темной материей» и таинственными «черными дырами». Дело в том, что если ускорение к центру галактики

можно объяснить притяжением «черной дыры», то ускорение от центра галактики этим никак не объяснишь. Следовательно, приходится предполагать «темную материю», которая загадочным образом расположена по краям галактики, причем, она почему-то не заслоняет от нас эту галактику, а расположена она лишь там, где будет угодно ее расположить теоретикам от астрофизики. Они пошли дальше, они расположили «темную материю» и вокруг всей Вселенной. Отказавшись от объективности и от бесконечности времени, они отказались и от бесконечности и объективности пространства. В их концепции Вселенная ограничено и по времени, и по пространству, само понятие пространства субъективно, крайне неконкретно, оно как-то закручено, расширяется и прочее, и прочее. Некоторые считают, что противоположные концы пространства в бесконечности соединяются. Очень многие полагают, что размерность пространства не ограничивается тремя, всерьез говорят о четырехмерном пространстве и пространстве более высоких метрик, уже и 18-мерное пространство вошло в обиход как якобы отражение фактически существующей физической реальностью. Этот поток новобогословских антинаучных безапелляционных и бесосновательных гипотез, зачисляемых оптом в ранг «подтвержденных фактами научных теорий» невозможно не только остановить, его даже невозможно охватить в «научном обзоре» приемлемой длины. Исписаны горы бумаги, сформированы миллионы файлов с разъяснениями на эту тему, причем разъяснения дают лица, которых следует отправить в шестой класс начальной школы для изучения основ физики.

#### 6.4. Малоизвестные эксперименты?

Автор цитирует А.К. Тимирязева, утверждающего, что принцип постоянства скорости света опровергнут девятью тысячами тщательнейших измерений. Утверждается, что А.К. Тимирязев выступил с этим заявлением на V съезде русских физиков в Москве в декабре 1926 года, но А.Ф. Иоффе на это отреагировал отрицательно. Далее говорится о доносе Гамова на Тимирязева непосредственно Сталину. Далее встречены некоторые дифирамбы Ленарду и его книге «О принципе относительности, эфира, тяготении», но в перечне литературы эта книга не найдена. Вместе с тем, ее достаточно просто отыскать в сети [24]. Весь этот сумбур не к лицу доктору физико-математических наук. Приведенных в этой главке фактов (если это факты) достаточно для написания объемного научного исследования, которое, если оно было бы написано на достоверном материале, было бы очень важным для научного мировоззрения в этой области. Но этого нет. Когда говорится о девяти тысячах тщательнейших измерений, на которые нет места в данной книге, это очень

напоминает утверждения авторов Евангелий о том, что Иисус совершал столь великое множество чудес, что в данной книге просто нет места для того, чтобы всех их описать и даже просто перечислить. Интересно получается: от имени любимых учеников Иисуса пишется якобы описание его жизни и деятельности, но трое из четырех авторов беззастенчиво заимствуют описания у четвертого автора, почти ничего своего не внося, но при этом заявляют, что могли бы много чего поведать важного, относящегося к теме работы, того, что было бы для любого читателя, на которого эти книги рассчитаны, драгоценностью, бесценным даром. Но у них, видите ли, нет места для того, чтобы описать то, для чего они, собственно, и взяли в руку перо. Так и господин Бояринцев, имея для подтверждения своих тезисов сведения о девяти тысячах тщательных экспериментов, не описывает ни один из них, но при этом треть книги уделяет критике Ландау, а другую треть книги – восхвалению Менделеева, что вовсе не требуется по теме книги, объявленной как «АнтиЭйнштейн».

### 6.5. О сверхсветовой скорости

Автор приводит аргументы релятивистов о том, что если антирелятивисты не согласны с тем, что скорость света в вакууме – предельная скорость для материальных частиц, то пусть тогда они назовут хотя бы один пример такого, когда эта скорость выше. Проблема поставлена, но решения этой проблемы в книге нет. Почему же? Надо было назвать такие примеры.

Во-первых, при вспышке сверхновой было сначала зафиксирован мощный поток нейтрино, а лишь за тем – световая вспышка [16]. Чем это можно объяснить? Неужели тем, что было два взрыва одной звезды, сначала только нейтринный взрыв, без высвобождения света (значит и без выделения энергии?), затем взрыв только с высвобождением света? Но именно такое объяснение предлагают релятивисты, не понимая, что они совершенно оторвались от понимания того, что может быть в реальности, а чего быть никак не может. Безусловно, в этой ситуации следует признать, что взрыв был одновременно, что **поток нейтрино двигался к Земле быстрее, чем поток света**. Во всяком случае, он его обогнал. Что тому причина – это другой вопрос. Либо свет двигался медленнее, либо нейтрино двигался быстрее, чем скорость света в вакууме. Но если релятивисты скорость света в вакууме считают постоянной, а межзвездное пространство приравнивают к вакууму (две большие ошибки, которые, тем не менее, имеют место), тогда они должны признать, что нейтрино двигались быстрее.

Во-вторых, зарегистрировано великое множество треков от частиц, с таким свойством, что эти треки были явно больше произведения времени жизни таких частиц на скорость света.

Такое произведение дает максимальную возможную длину трека от таких частиц. Как же образовались такие треки? Из этого следует простой вывод: **скорость таких частиц была больше скорости света**. Но релятивисты утверждают иное – время у этих частиц замедлилось вследствие движения, следовательно, в их собственных системах координат они существовали на протяжении того времени, которое было им отведено физическими законами, но этот интервал времени растянулся вследствие эффекта замедления хода времени в движущихся системах. При таком подходе, где главное в трактовке результата – это сохранение тезисов теории относительности, никогда никакой эксперимент не сможет опровергнуть теорию относительности (кроме, пожалуй, эксперимента с интерферометром Майкельсона, заполненным прозрачной средой [11]).

В-третьих, всякий свет, имеющий место, всегда порожден тем, что электрон двигался со скоростью, большей, чем скорость света в данной среде. Если это имело место в веществе, то это было проявлением эффекта Черенкова. Но если это имело место в вакууме, это было иным проявлением того же самого эффекта и даже в общем в аналогичных условиях. **Все факты свечения каких-либо частиц в вакууме подтверждают тот факт, что эти частицы двигались со скоростью, большей, чем скорость света**.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Нельзя согласиться ни с одной из трактовок какого-либо эксперимента, где свет приравнивается к потоку вещества [26]. Тому достаточно причин. Например, см. статью [4].

Нерешенных задач в физике много, можно различить три разные разновидности таких задач.

1. Задачи, которые являются парадоксальными и никогда не будут правильно решены в рамках тех оков предрассудков, которые сложились в сегодняшней теоретической физике.

2. Задачи, которые не решены только лишь потому, что пока еще не придумали и не создали оборудования для соответствующих исследований.

3. Задачи, которые никогда не будут решены, поскольку никогда человечество не сможет обладать инструментарием для экспериментального исследования в этих областях.

При этом некоторые задачи, которые мы относим к третьим, могут на деле относиться ко вторым, а те, которые мы относим ко вторым, на самом деле могут относиться к третьим.

Также нет принципиальной разницы в том, что задача будет решена через сто (двести, триста, пятьсот, тысячу) лет, или не будет решена никогда.

Поэтому задачи, относящиеся к пунктам 2 и 3, попросту нет смысла рассматривать сегодня. Следует сосредоточиться лишь на задачах из пункта 1.

Уже при нынешнем состоянии науки можно было бы отказаться от ряда принципиальных ошибок, и тогда теоретическая физика была бы не только более простой и стройной (что еще не является доказательством ее истинности), но она также больше бы соответствовала истинной картине мира.

Поэтому все, что отдаляет физику от истинной картины мира, следует считать антинаучным, а все, что приближает к ней, следует считать научным.

Критика СТО и ОТО с этой позиции важна, но не всякая, а лишь та, которая критикует ТО за отказ от объективного эфира. Для такого отказа не было достаточных оснований.

Критика квантовых представлений также справедлива в силу высказанных выше причин. А все, что основывается на квантовых представлениях, пытается развить эти представления, большей частью ведет к углублению противоречий и затуманиванию физических представлений о фактических законах мироздания.

Единственное «полезное» в ложных теориях может быть то, что они при своем «последовательном развитии» способны развиться до полного абсурда, что должно бы заставить их апологетов отказаться от этих теорий. Подобные воззрения, словно опухоль, должны дозреть до такого этапа, когда от них будет легче избавиться. Но жизнь продемонстрировала, что сколь бы ни были абсурдными выводы из абсурдных теорий, это не приводит к их отказу, а напротив приводит к тому, что «знатоков» теорий становится все меньше, этот закрытый клуб вспенивает и надувает свою дутую значительность все более и более, и на их «исследования» правительства тратят все больше и больше средств. Это глобальное оглушение теперь приводит к тому, что совершенно оторвавшиеся от реальности «ученые», которые ничего не смыслят в физике даже на уровне школьного образования (задача о полом астероиде), занимаются развитием и популяризацией псевдонаучных гипотез, выдаваемых за истинно научные знания. В этот процесс влились и телевизионные программы, которые снимают анимированные сериалы о строении Вселенной, показывая красочные картины взрывов, черных дыр, темной материи и прочую фантастику под видом научно установленных фактов.

Появились многие теории, развивающие идеи релятивизма до еще большего абсурда, в частности теории 18-мерных пространств, теории струн и прочее, и прочее.

Все это необоснованные математические фантазии, ценность которых имеется лишь для

праздного ума любителей фантастики. Изображаемые картины, потрясающие воображение, не имеют никакого отношения к реальности.

Любопытно, что, как это часто бывает в жизни, все новое на поверку оказывается ранее известным. Так, например, идея об интерферометре, заполненным светопроводящей средой, как выяснилось, высказана была еще К. Мёллером в 1952 г. Действительно, в 1957 г. он ссылается на статью от 1952 г.: «В течение последних 50 лет многие следствия, вытекающие из специальной теории относительности, нашли блестящее подтверждение. Тем не менее, за исключением двух классических опытов – Майкельсона и Ивеса, не существует достаточно точных экспериментов, дающих непосредственной подтверждение самого принципа относительности. Ранее уже указывалось [27], что некоторое обобщение опыта Майкельсона, заключающееся в заполнении интерферометра средой с большим коэффициентом преломления, дало бы еще одну возможность проверки принципа относительности, который в данном случае нельзя было бы объяснить с помощью гипотезы о сокращении размеров движущихся тел. Однако ввиду огромного количества накопленного к настоящему времени экспериментального материала, подтверждающего выводы специальной теории относительности, вряд ли имеет смысл тратить силы и средства на повторение этого довольно сложного и дорогостоящего опыта» (здесь в цитате номер ссылки изменен в соответствии с нашей библиографией) [28]. Любопытно, что если только два опыта дают подтверждение принципа относительности, то о каких других опытах, которые на протяжении 50 лет ее подтверждали, можно вести речь? Кроме того, опыт Майкельсона отнюдь не подтверждает принцип относительности: он, возможно, подтверждал бы его, если бы этот принцип был сформулирован вне зависимости от этого опыта и до получения в нем результатов, и если бы такая теория давала прогноз этого опыта, который бы впоследствии подтвердился. Если же на основе уже известного опыта строится некоторая теория, то этот опыт никак не может служить подтверждением этой теории. Так обстояло дело со смещением перигелия Меркурия, так же точно обстоит дело и с опытом Майкельсона – не эти экспериментальные сведения подтверждают СТО и ОТО, а СТО и ОТО строят свои гипотезы на основании этих уже известных сведений. Поэтому никакой речи об экспериментальном доказательстве здесь быть не может. Но вот что интересно: автор интуитивно высказал возможность действительной проверки СТО и ОТО, но почему-то решил, что, во-первых, такой опыт очень дорогостоящ, во-вторых, делать его нет смысла, поскольку в СТО и в ОТО автор уже не сомневается. То есть нам настолько не нужны

настоящие научные сведения, что мы считаем, что заполнить интерферометр Майкельсона средой – это слишком разорительно? Наконец, автор не увидел, что при любом исходе этого опыта СТО и ОТО будут опровергнуты. А ведь это означает, что даже если и не делать этот опыт, от СТО следует отказаться, а тем более от ОТО, которая является слишком уж фантастическим развитием СТО.

Что касается упомянутого опыта Ивеса, который правильнее назвать опытом Ивеса-Стилвелла [29], то в этом опыте полученный сдвиг частоты трактуется как доказательство изменения времени, что следует признать чрезмерно расширенным толкованием, далеким от того, что мы называем научным обоснованием.

К слову сказать, пресловутая теория струн, которая выдается за нечто совершенно новое, на самом деле отнюдь не нова. Эти идеи были высказаны еще А.Ю. Морозовым в 1990 году или ранее [30].

## ВЫВОДЫ

1. **Вселенная не расширяется.** Звезды не разлетаются. Галактики не разлетаются. Звезды в пределах Галактики не разлетаются. Все в среднем стационарно. Никогда не было «зарождающего взрыва Вселенной». Вселенная никогда никем и не из чего не создавалась, она существует всегда, в общем и целом, такой, какова она в среднем есть, никаких глобальных вселенских процессов в ней нет, есть лишь эволюция отдельных объектов и их скоплений. Есть эволюция звезд, эволюция галактик, эволюция метagalactic, но всегда были, и всегда будут существовать наряду со старыми звездами новые и сверхновые, всегда были, и будут существовать наряду со старыми туманностями новые и сверхновые и так далее. Причина ошибочных утверждений о том, что Вселенная расширяется, является красное смещение в свечении звезд. Но это смещение объясняется потерей энергии света звезд вследствие дисперсии в межзвездном пространстве, которое есть разреженный газ. Хотя этот газ и чрезвычайно разрежен, но его чрезвычайно много на пути света от каждой звезды. Это дает объяснение красному смещению. Другое объяснение ошибочно.

2. **Время вечно и объективно, оно течет везде одинаково.** Не было зарождения Вселенной, поскольку нет расширения. Не было и зарождения пространства. Не будет остановки времени, не будет гибели пространства, или его сворачивания, сжимания, скручивания или чего бы то ни было подобного.

3. **Нет никаких «черных дыр», нет никакой «темной материи».** И поскольку нет расширения, то нет и никаких оснований для ее предположения. Если бы даже расширение было, то и в этом случае оснований для предположения

«темной материи» не было бы, поскольку такое предположение нисколько не объясняло бы расширения, так как внутри полого астероида гравитационное поле от масс этого астероида равно нулю. Это известный из физики факт, он применим и к гипотезе полой оболочке из темной материи, окружающей вселенную, если бы даже она была, то гравитационное поле от нее было бы равным нулю. Не только в центре такой полой сферы, но и вблизи ее оболочки гравитация равна нулю. Этого стыдно не знать тем, кто рассуждает о строении Вселенной, основываясь на чрезвычайно расширительном толковании всего лишь двух фактов – эффекта Хаббла и опыта Майкельсона.

4. **Свет – это поток энергии, имеющий лишь волновые свойства.** Все попытки найти в свете корпускулярные свойства ошибочны, и трактовки подобных экспериментов ошибочны. Волновая теория достаточна для объяснения всех свойств света. Волна распространяется в среде, которую невозможно выявить экспериментально в настоящее время при настоящем уровне развития техники, за исключением тех известных фактов, что в этой среде свободно распространяется свет и все другие виды электромагнитных полей, электростатические поля и гравитационные поля. Эта среда ответственна за распространение всех этих полей.

5. **Эфирный ветер не мог быть обнаружен в опытах Майкельсона, поскольку эффекты, вызываемые им, влияют и на размеры интерферометра Майкельсона.** Никакие объяснения об увлечении эфира массивными телами, а также о зависимости скорости света от скорости источника не требуются. Однако, следует признать, что теория Ритца, если ее сформулировать в отношении фазовой скорости света, совершенно справедлива, и поэтому она также должна быть признана верной.

6. **Теория относительности Эйнштейна ошибочна.** Она самом деле должна была бы называться «Гипотезой абсолютности скорости света», так как такое название более точно отвечает ее сути. При этом названии она, безусловно, была бы отвергнута. Как гипотеза она не подтверждена. То, что имело бы право называться «Теория относительности», на самом деле, должна постулировать относительность всех систем отсчета относительно единственной выделенной неподвижной системы, которая всегда имеет место с некоторой справедливой оговоркой. А именно: в каждом конкретном случае конкретных взаимодействий существует единственная система, в которой все уравнения движения принимают наиболее простой вид. Это происходит по той причине, что эта система проявляет себя в этом эксперименте как инерциальная система. Центр масс всех тел, задействованных в этом дви-

жении, с достаточным основанием и с достаточной степенью точности можно принять за центр этой системы и привязать к такому центру систему отсчета. Относительно отыскания «стационарного» положения и нестационарного положения направления осей (с учетом возможного момента вращения) задача в общем виде кажется достаточно сложной, но на практике всегда имеются основания для того, чтобы установить стационарные направления по трем координатам. В частности, в задачах исследования движения Земли можно указать по звездам направление "Север", увязав с этим направлением, например, ось Z, а также выбрать направления на какие-либо звезды, чтобы задать направления осей X и Y. В этих задачах центром системы отсчета должен считаться не центр Солнца, а центр масс всех небесных тел Солнечной системы. Это не одно и то же. Поэтому такое уточнение даст более точные расчеты движений планет и астероидов Солнечной системы.

**7. Все звезды образуются путем накопления массы вследствие действия сил гравитации.** Начинаться все может с объединения двух пылинок. Процесс имеет положительную обратную связь: чем больше частиц слипаются, тем больше их гравитационное поле, тем быстрее они собираются в еще большее скопление. Этот процесс в контуре сам себя разгоняет: чем больше масса, тем быстрее процесс, чем быстрее процесс, тем больше масса. Поэтому если бы не было причины, препятствующей необратимому бесконечному развитию этого процесса, то все массы бы со временем скопились в одном месте, во всей Вселенной была бы лишь одна большая черная дыра, и ничего больше. Но этого не происходит, что говорит о том, что ограничение на массу небесного тела существует. Следовательно, **все звезды не вечны.** Имеется критическая масса, при которой давление внутри звезды столь сильно, что происходят термоядерные процессы, которые разрывают звезду на более мелкие фрагменты. Именно поэтому ни одна звезда не может стать «черной дырой» и поэтому «черных дыр» не существует. Чем больше масса звезды, тем меньше времени ей осталось существовать. Небесное тело с массой, выше критической, существовать стационарно не может.

**8. Свечение небесных тел – следствие их большой массы,** поскольку чем больше масса, тем больше давление внутри этих тел. Это приводит к ядерным и термоядерным реакциям внутри этих тел. Если бы Земля имела размеры Солнца, она бы и светила ровно так же, как Солнце. Если бы Солнце имело размеры Земли, оно бы не светило, а имело бы лишь теплое ядро, как Земля. Более яркие звезды имеют большую массу. Звезды не остывают от того, что их энергия исчерпалась. Просто они

находятся на различных расстояниях от нас, что приводит к различному их видимому свечению. Расстояние до них зачатую определено ошибочно, что вызывает ошибочную их классификацию. Ошибка проистекает из принятия гипотезы разбегания звезд и галактик, которая возникла по причине неверного объяснения красного смещения. На самом деле красное смещение объясняется дисперсией света в межзвездном веществе. Частично смещение спектра звезд, разумеется, может быть объяснено их скоростью по отношению к Земле, но для большинства небесных светил этот фактор не главный. Хотя известны небесные тела, спектр которых смещен в фиолетовую область. Эти тела, безусловно, приближаются к Земле, причем, их скорость на самом деле выше, чем определена по этому смещению, так как и для этих тел имеется еще и красное смещение вследствие дисперсии света, но итоговое смещение в их свете для наблюдателя на Земле все же направлено в фиолетовую область.

**10. Ошибкой Эйнштейна было вводить понятие «система отсчета» вместо «системы координат».** В такой системе привязка делается не к пространству, а к наиболее массивному телу. В такой системе это наиболее массивное тело обязательно покоится, так как к нему привязано начало координат. Поэтому в подобной системе, привязанной, например, к Солнцу, само Солнце остается неподвижным, что в корне не верно, это дает искаженную картину мира. На самом деле оно также движется под действием изменения суммы гравитационных сил от планет, образующих вместе с ней Солнечную систему. Следует отметить, что при гигантских расстояниях, на которых время распространения света и гравитационных полей ощутимо отличается от нуля (например, свет от Солнца распространяется до Земли около 8 минут), понятие «центра масс» ввести не так уж и просто. Это центр, от которого исходит равнодействующая всех гравитационных сил. Для каждой точки Солнечной системы этот центр масс имеет две ипостаси – фактический центр масс – это объективный центр масс в каждый момент времени, его можно лишь рассчитать теоретически, и «эффективный центр масс» – тот, каковым его воспринимает небесное тело из данной точки пространства. Поэтому расчеты смещения перигелия всех планет осуществлены в рамках такого подхода не верно, из-за чего они и не совпадают с действительностью. Тем самым всегда можно задать условно покоящуюся условно инерциальную систему отсчета, хотя это очень непросто.

**11. Квантовая теория ошибочна.** Она была создана для того, чтобы объяснить стационарность орбит электронов в атомах и молекулах, а также чтобы объяснить эффекты при излучении тел. Оба класса этих явлений

легко объясняются на основе обычной не квантовой физики с использованием того факта, что скорость света не бесконечна, а также с использованием теории замкнутых динамических систем.

**12. Скорость света в вакууме - не предельная скорость движения для материальных тел.** По меньшей мере, скорость распространения полей взаимодействия тех субэлементарных частиц, из которых состоят элементарные частицы, выше, чем скорость света в вакууме. Есть основания считать, что и нейтрино может двигаться быстрее, и что электрон и другие элементарные частицы во многих широко известных опытах на самом деле двигались быстрее скорости света в вакууме. В этих случаях ошибочно наблюдаются античастицы. При движении нейтрально заряженной частицы со скоростью больше, чем скорость света, получается трек, который длиннее, чем время их жизни, умноженное на скорость света. Это доказывает, что их скорость была выше скорости света. Теория о замедлении времени в их системах отсчета ошибочна.

**13. Все факты зарождения света связаны с достижением материальными частицами (электронами) сверхсветовой скорости,** после чего они тормозятся с излучением лишней энергии. При попадании электрона в вещество это явление известно и носит название эффекта Черенкова. Но официальная наука не признает и никак не реагирует на сообщение о том, что этим явлением объясняется природа всех видов оптического излучения, хотя эта теория давно уже изложена и опубликована.

**14. Стационарность положения электронов на орбитах в атомах и молекулах объясняется с позиции классической физики.** Она связана не с квантовыми свойствами энергии, а с особенностями движения электронов, в атомах и молекулах возникают автоколебания вследствие неустойчивости их движения к ядрам, поэтому если электрон имеет больше энергии, чем если бы он был на стационарной орбите, то излишек энергии он излучает, а если он имеет меньше энергии, то недостаток энергии он получает от электромагнитных полей вокруг него.

**15. При движении частицы со скоростью, близкой к скорости света, ее масса не возрастает, а ослабевает сила взаимодействия,** что и дает наблюдаемый эффект.

#### ЛИТЕРАТУРА

[1] В. Бояринцев. АнтиЭйнштейн. Главный миф XX века. – М.: Яуза. 2005. – 320 с. . ISBN 5-87849-181-8.  
 [2] В.А.Жмудь. О природе релятивистской концепции поправки к данным от глобальных систем GPS и ГЛОНАСС: взгляд с позиции теории замкнутых систем (автоматики). Автоматика и программная инженерия. 2014. № 4(10). С.87-141.

[http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11_0.pdf)  
 [3] В.А. Жмудь. Корпускулярно-волновая дилемма и её противопоставление дуальности. ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 109–119.  
 [4] В.Н. Матвеев. В третье тысячелетие без физической относительности? М. 2000.  
 [5] В.И. Секерин. Теория относительности – мистификация века. Новосибирск. 1991. ISBN 5-08-007486-9.  
 [6] Бриллюэн Л. Новый взгляд на теорию относительности. М. 1972.  
 [7] Жмудь В.А. Динамическое полевое взаимодействие, теория относительности и квантовая теория. Часть I. - Сб. научн. трудов НГТУ 2000, Новосибирск, N 1(18), с.131 - 138.  
 [8] Жмудь В.А. Динамическое полевое взаимодействие, теория относительности и квантовая теория. Часть II. - Сб. научн. трудов НГТУ 2000, Новосибирск, N 3(20), с.131 - 137.  
 [9] 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.  
 [10] В.А. Жмудь Интерферометр. Патент на полезную модель № 107346. Заявка № 2011100243, Класс МПК G01 В 9/02 (2006.01). Зарегистрировано 10 августа 2011 г., Опубликовано в бюллетене №22, 10.08.2011. Правообладатель: Учреждение Российской академии наук Сибирское отделение РАН Институт лазерной физики (Ru).  
 [11] В.А. Жмудь. О принципиальном отличии методов доказательств от методов убеждений. Автоматика и программная инженерия 2013. №3 (5). С. 87–104. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).  
[http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2013-15\\_2.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2013-15_2.pdf)  
 [12] В.А. Жмудь. К новым гипотезам в области трактовки понятий электродинамики, гравитации и физического вакуума. Автоматика и программная инженерия 2013. №4 (6). С. 82–89. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).  
<http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2013-08.pdf>  
 [13] В.А. Жмудь. Теорема Котельникова-Найвиста-Шеннона, принцип неопределенности и скорость света. Автоматика и программная инженерия 2014. №1 (7). С. 127–136. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).  
<http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2014-16.pdf>  
 [14] В.А. Жмудь. Против антинаучных концепций в форме научных изданий. (ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия) Автоматика и программная инженерия 2014. №2 (8). С. 125–137.  
[http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2014-12\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2014-12_0.pdf)  
 [15] В.А. Жмудь. О природе релятивистской концепции поправки к данным от глобальных систем GPS и ГЛОНАСС: взгляд с позиции теории замкнутых систем (автоматики). Автоматика и программная инженерия. 2014. №

- 4(10). С.87-141.  
[http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11_0.pdf)
- [16] А.А. Майкельсон. Световые волны и их применение. Пер. с англ. 1912. Тип. Акционерного Южно-Русского общества печати Дела. Одесса. 190 с.
- [17] А.А. Майкельсон. Исследования по оптике. Пер. с англ. под ред. П.С. Тартаковского с прим. и доп. И.В. Обреимова. М.- Л. Государственное издательство. 1929.
- [18] В.А. Ацюковский. Эфирный ветер. Энергоатомиздат. 1993.
- [19] Ю.М. Галаев. Эйриный ветер. Эксперимент в диапазоне радио волн. Тетит. 2000.
- [20] А. Эйнштейн. Эфир и теория относительности. Соч., т.1, ст.682 – 6589. М. Наука. 1965.
- [21] С какой скоростью мы движемся сквозь вселенную. Лайфхакер.  
<https://lifthacker.ru/2015/09/27/s-kakoj-skorostyu-my-dvizhemsya-skvoz-vseleennyu/>
- [22] Ф. Ленард. О принципе относительности, эфире, тяготении (критика теории относительности).  
<http://bourabai.kz/lenard/ether0.htm>
- [23] Ю. Писарев. Дайте слово Логунову. Дуэль, 1998. Т 8.
- [24] Г.С. Ландсберг. Оптика. М. 1952.
- [25] Эссе о свете. Б.В. Пилат. ISBN 5-93348-042-8.
- [26] Möller. С. Theory of relativity. Oxford. 1952. Ch. 2. P.64.
- [27] К. Мёллер. О возможности экспериментальной проверки общей теории относительности в земных условиях. Эйнштейновский сборник. 1978-1979. Сб. статей. М. Наука. 1983. С.280–300. Пер. англ.: Möller. С. On the possibility of terrestrial tests of the general theory of relativity. - Nuove cim. Ser. 10. Supp. 1957. 45, с. 381 – 398.
- [28] Опыт Ивеса-Стилвелла.  
<http://novmysl.ru/SpecialRelativity/DopplerEffect.html>
- [29] Морозов А.Ю. Струны в теоретической физике. Эйнштейновский сборник. 1986-1990. Сб. статей. М. Наука. 1990. С.375 – 397.



**Вадим Аркадьевич Жмуд** - заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.  
E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

630073, Новосибирск, просп. К.Маркса, д. 20

Статья поступила 29 марта 2018 г.

## Relativity in the Light of the Theory of Locked Dynamical Systems and Criticism of its Criticism

V.A. Zhmud

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

*Abstract:* Inadequate mathematical tools generate the main shortcomings of the theory of relativity. The authors of this theory and its followers did not possess the tools of the theory of locked dynamical systems (automatics, automatic control). Therefore, they did not find explanations for the phenomena that, with this theory and its mathematical tools, can be explained in a new way. In this case, the postulates of the theory of relativity are not only superfluous, but also reliably erroneous, at least in their totality. So, one of the two is reliably erroneous. In this paper is a continuation of the discussion on this topic of the discussion of the book by Vladimir Boyarintsev “AntiEinstein” [1], started in our previous publication [2]. This paper is aimed at extracting useful thoughts, quotes, arguments from this publication, which, unfortunately, as a whole should be assessed negatively. The negative evaluation of the publication is based, first, on a large number of signs of the antisience of this publication in spite of the fact that it was written by the doctor of physical and mathematical sciences and affects precisely the physical and mathematical sciences. First, the analysis of nationality, religious predilections, human qualities, domestic relations and other details of the personality of Einstein has nothing to do with the question of the truth or falsity of his theory, even if such an analysis was carried out by scientific methods, i.e. with reference to reliable sources. In addition, any information about supporters or opponents of any scientific theory can only be cognitive, but cannot serve as a proof or refutation of this theory. Criticism is done haphazardly, it does not end with any positive suggestions about what kind of theory should be adopted in this case if, after agreeing with the author of this publication, still abandon the theory of relativity. Unification in any coalition on the principle of "enemy of my enemy is my friend" is inadmissible in science, since not everyone who criticizes a theory that cannot be accepted automatically falls into the list of fairly critical scientists. However, for all the shortcomings, this book can serve as a source for informed analysis, if we extract from it the bit of valuable that we should agree with. In addition, the errors in this publication can also serve as an example of science for unscientific reasoning or as an information opportunity to eliminate ambiguities in the discussed range of issues. This article gravitates in the theory of automatic control, because, as it was repeatedly stated many times, the questions discussed and solved by the theory of relativity can be attributed to the field of analysis of closed dynamic systems, the lack of erudition in this area contributed to some erroneous theses of the theory under discussion.

*Key words:* theory of relativity, Einstein, relativism, scientific criteria, truth, hypothesis, theory.

REFERENCES

- [1] V. Boyarintsev. AntiEynshteyn. Glavnyy mif XX veka. – M.: Yauza. 2005. – 320 s. . ISBN 5-87849-181-8.
- [2] V.A.Zhmud'. O prirode relyativistskoy kontseptsii popravki k dannym ot global'nykh sistem GPS i GLONASS: vzglyad s pozitsii teorii zamknutykh sistem (avtomatiki). Avtomatika i programmnaya inzheneriya. 2014. № 4(10). S.87-141. [http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11_0.pdf)
- [3] V.A. Zhmud'. Korpuskulyarno-volnovaya dilemma i yeyo protivopostavleniye dual'nosti. FGBOU VPO NGTU, Novosibirsk, Rossiya. Avtomatika i programmnaya inzheneriya. 2016. № 2 (16). S. 109–119.
- [4] V.N. Matveyev. V tret'ye tysyacheletiy bez fizicheskoy otositel'nosti? M. 2000.
- [5] V.I. Sekerin. Teoriya otositel'nosti – mistifikatsiya veka. Novosibirsk. 1991. ISBN 5-08-007486-9.
- [6] Brilliyen L. Novyy vzglyad na teoriyu otositel'nosti. M. 1972.
- [7] Zhmud' V.A. Dinamicheskoye polevoye vzaimodeystviye, teoriya otositel'nosti i kvantovaya teoriya. Chast' I. - Sb. nauchn. trudov NGTU 2000, Novosibirsk, N 1(18), s.131 - 138.
- [8] Zhmud' V.A. Dinamicheskoye polevoye vzaimodeystviye, teoriya otositel'nosti i kvantovaya teoriya. Chast' II. - Sb. nauchn. trudov NGTU 2000, Novosibirsk, N 3(20), s.131 - 137.
- [9] Zhmud' V.A. Obosnovaniye nerelyativistskogo nekvantovogo podkhoda k modelirovaniyu dvizheniya elektrona v atome vodoroda // Sbornik nauchnykh trudov NGTU. Novosibirsk. 2009. 3(57). S. 141 – 156.
- [10] V.A. Zhmud' Interferometr. Patent na poleznuyu model' № 107346. Zayavka № 2011100243, Klass MPK G01 B 9/02 (2006.01). Zaregistrirvano 10 avgusta 2011 g., Opublikovano v byulletene №22, 10.08.2011. Pravoobladatel': Uchrezhdeniye Rossiyskoy akademii nauk Sibirskoye otdeleniye RAN Institut lazernoy fiziki (Ru).
- [11] V.A. Zhmud'. O printsipial'nom otlichii metodov dokazatel'stv ot metodov ubezhdeniy. Avtomatika i programmnaya inzheneriya 2013. №3 (5). S. 87–104. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossiya). [http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2013-15\\_2.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2013-15_2.pdf)
- [12] V.A. Zhmud'. K novym gipotezam v oblasti traktovki ponyatiy elektrodinamiki, gravidinamiki i fizicheskogo vakuuma. Avtomatika i programmnaya inzheneriya 2013. №4 (6). S. 82–89. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossiya). <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2013-08.pdf>
- [13] V.A. Zhmud'. Teorema Kotel'nikova-Nayvista-Shennona, printsip neopredelennosti i skorost' sveta. Avtomatika i programmnaya inzheneriya 2014. №1 (7). S. 127–136. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossiya). <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2014-16.pdf>
- [14] V.A. Zhmud'. Protiv antinauchnykh kontseptsiy v forme nauchnykh izdaniy. (FGBOU VPO NGTU, Novosibirsk, Rossiya) Avtomatika i programmnaya inzheneriya 2014. №2 (8). S. 125–137. [http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2014-12\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2014-12_0.pdf)
- [15] V.A. Zhmud'. O prirode relyativistskoy kontseptsii popravki k dannym ot global'nykh sistem GPS i GLONASS: vzglyad s pozitsii teorii zamknutykh sistem (avtomatiki). Avtomatika i programmnaya inzheneriya. 2014. № 4(10). S.87-141. [http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11\\_0.pdf](http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-11_0.pdf)
- [16] A.A. Maykel'son. Svetovyye volny i ikh primeneniye. Per. s angl. 1912. Tip. Aktsionernogo Yuzhno-Russkogo obshchestva pechati Dela. Odessa. 190 s.
- [17] A.A. Maykel'son. Issledovaniya po optike. Per. s angl. pod red. P.S. Tartakovskogo s prim. i dop. I.V. Obreimova. M.- L. Gosudarstvennoye izdatel'stvo. 1929.
- [18] V.A. Atsyukovskiy. Efirnyy veter. Enegroatomizdat. 1993.
- [19] Yu.M. Galayev. Eyirnyy veter. Eksperiment v diapazone radio voln. Tetit. 2000.
- [20] A. Eynshteyn. Efir i teoriya otositel'nosti. Soch., t.1, st.682 – 6589. M. Nauka. 1965.
- [21] S kakoy skorost'yu my dvizhemsya skvoz' vseennuyu. Layfhaker. <https://liferhacker.ru/2015/09/27/s-kakoy-skorostyu-my-dvizhemsya-skvoz-vseennuyu/>
- [22] F. Lenard. O printsipe otositel'nosti, efire, tyagoteni (kritika teorii otositel'nosti). <http://bourabai.kz/lenard/ether0.htm>
- [23] Yu. Pisarev. Dayte slovo Logunovu. Duel', 1998. T 8.
- [24] G.S. Landsberg. Optika. M. 1952.
- [25] Esse o svete. B.V. Pilat. ISBN 5-93348-042-8.
- [26] Möller. C. Theory of relativity. Oxford. 1952. Ch. 2. P.64.
- [27] K. Moller. O vozmozhnosti eksperimental'noy proverki obshchey teorii otositel'nosti v zemnykh usloviyakh. Eynshteynovskiy sbornik. 1978-1979. Sb. statey. M. Nauka. 1983. S.280–300. Per. angl.: Möller. C. On the possibility of terrestrial tests of the general theory of relativity. - Nuove cim. Ser. 10. Supp. 1957. 45, c. 381 – 398.
- [28] Opyt Ivesa-Stilvella. <http://novmysl.ru/SpecialRelativity/DopplerEffect.html>
- [29] Morozov A.YU. Struny v teoreticheskoy fizike. Eynshteynovskiy sbornik. 1986-1990. Sb. statey. M. Nauka. 1990. S.375 – 397.



**Vadim Arkadievich Zhmud** – Head of the Department of Automation in NSTU, Professor, Doctor of Technical Sciences. E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

630073, Novosibirsk, str. Prosp. K. Marksa, h. 20

The paper was received on March 29, 2018.

# Современные методы измерения частоты и фазы в реальном времени

Д.О. Терешкин, В.М. Семибаламут

Сибирское отделение геофизической службы СО РАН, Новосибирск Россия

*Аннотация:* Измерениями частоты и фазы занимаются многие научно-исследовательские коллективы и инженерные группы. Взгляд на эти вопросы развивается с некоторым отставанием от современных научно-технических потребностей. Существует множество коллективов, которые используют устаревшие представления о таких измерениях. Продолжает выпускаться большими партиями аппаратура, которая не отвечает потребностям, и которая с легкостью могла бы быть модифицирована до современных научно-технических средств измерений. Ошибочная трактовка некоторых свойств частотных и фазовых измерений приводит к неэффективной организации исследований, к непроизводительному расходованию средств и времени научно-исследовательских коллективов, к финансированию разработок, которые не отвечают поставленным задачам. Данная статья направлена на корректировку таких понятий как «точность», «погрешность», «стабильность», «воспроизводимость», «невоспроизводимость», «нестабильность», и некоторых других.

*Ключевые слова:* Частота, фаза, точность, погрешность, воспроизводимость, нестабильность, параметр Аллана, дисперсия, стабильность, невоспроизводимость, частотные измерения, фазовые измерения

## ВВЕДЕНИЕ

Измерения частот с наивысшей точностью в настоящее время является одной из важнейших технических задач наряду с генерацией опорной частоты также с наивысшей точностью. Успехи в этой области значительны. Например, сообщается о том, что достигнута точность стабилизации частоты с показателями порядка  $1 \cdot 10^{-18}$  (за 1000 с) [1, 2], имеются публикации и еще более высокими показателями, в этой же работе сказано: «Параметр Аллана составил  $\sim 2,6 \cdot 10^{-19}$  за 1000 сек для компоненты коротковолнового края».

Вместе с тем, надо признать, что зачастую заказчики и исполнители не понимают друг друга, поскольку говорят на разных языках в отношении терминологии, связанной с точностью стабилизации и измерения частоты. Терминология же в этой области позволяет совершенно честно заявлять о столь высоких характеристиках, которые почти не реальны, но при этом может оказаться, что характеристики на несколько порядков ниже при настоящем уровне техники, к сожалению, пока еще не достижимы. Отсюда следует актуальность согласования терминологии, классификации методов измерений и достижение единства в оценках погрешности (точности) частотных и фазовых измерений.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При сопоставлении достижений различных коллективов в расчет принимаются, как правило, лишь называемые численные показатели, без уточнения того, что это за показатели, к какому интервалу времени они

относятся. Получается, что тот, кто обосновал в публикации меньшее значение показателя, тот и достиг лучших результатов, безотносительно того, о каких, собственно, показателях идет речь. Работает магия чисел. Кто-то заявляет о семнадцати порядках, кто-то другой – о восемнадцати, третий о девятнадцати, двадцати, и так далее. В каких-то публикациях при желании можно найти и двадцать семь порядков. Можно ли сравнивать эти показатели между собой, об этом уже не задумываются.

Так, например, в диссертации и автореферате Н.А. Коляды [1, 2] погрешность фазовой системы автоподстройки частоты измеряется в единицах погрешности частоты, а именно, сказано: Полученный с помощью фотодиода радиочастотный сигнал биений стабилизируется путем фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с помощью подстройки длины резонатора (посредством пьезоэлектрических трансляторов). При этом измеренная вносимая синтезатором частотная нестабильность составила  $\sim 4 \cdot 10^{-18}$  (за 1000 с)» [1, с. 11].

Одна из проблем современного планирования исследований в области частотных и фазовых измерений состоит в том, что представители разных этапов процесса исследования, разработки, испытаний и применения измерителей и стандартов зачастую не достаточно верно понимают друг друга вследствие недостаточно согласованной терминологии в этой области. В частности, в терминах пользователей, в особенности, в стратегических направлениях технологий, погрешность формирования частоты понимается только как максимально возможное (допустимое) отклонение сформированной величины от его требуемого значения.

Соответственно, погрешность измерения в такой терминологии – это максимально возможное отклонение результата измерений истинного значения этой величины.

В науке такая величина называется предельно возможной или максимальным отклонением.

Но при оценке стандартов частоты этой величиной не пользуются, а используют совершенно иные величины, статистические оценки стабильности, которые могут быть на несколько порядков меньше. Отсюда может возникнуть непонимание, которое может даже привести к катастрофе при выполнении важнейших работ, где подобные ошибки недопустимы принципиально.

Данная статья исследует источники разночтений в терминологии и предлагает единую терминологию в этой области.

## 2. ПОНЯТИЕ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ

Понятие частота как таковая нелегально, оно не имеет смысла, если не привязано к интервалу времени, на котором эта частота измеряется (или формируется, или обсуждается).

Исторически это понятие произошло от понятия средней частоты, то есть величины, о которой идет речь, осредненной на некотором интервале времени. Исходно понятия текущей частоты или мгновенной частоты не существовало, пока она не была введена в соответствующей литературе.

Частота  $f$  или обратная ей величина – период  $T$  – являются основными параметрами любого периодического процесса. В общем случае частота характеризует число идентичных событий, происходящих в единицу времени. Для чисто периодических (не обязательно гармонических сигналов) строго справедливо лишь понятие периода, однако в этом случае широко пользуются понятием частоты, понимая под этим величину, обратную периоду. Для идеального гармонического сигнала (т.е. существующего бесконечное время с неизменными амплитудой и частотой) понятие частоты может быть строго определено, и эта величина не меняется во времени. Для любого другого сигнала корректно говорить лишь о средней за некоторое время частоте.

В радиотехнике обычно понятие “частота электрического сигнала” тесно связано с методом ее измерения, а именно: это цифровое значение, получаемое в результате измерения количества полных периодов данного сигнала, укладываемых в единицу времени.

Измерение частоты  $f_x$  и периода  $T_x$  синусоидального напряжения состоит в преобразовании исследуемого сигнала в последовательность кратковременных “счетных” импульсов той же частоты  $f_x$  и в подсчете числа этих импульсов за известный, строго определенный интервал времени  $T_C$ . Первая

операция выполняется так называемыми формирователями, вторая – счетчиками.

Интервал времени  $T_C$  формируют из высокостабильных колебаний, формируемых образцовым генератором с кварцевой или иной стабилизацией. Частоту колебаний  $f_R$  обычно выбирают из соотношения

$$f_R = m \cdot 10^k \text{ Гц},$$

где  $m$  – целое число,  $k$  – целое число (обычно 5, 6 или 7).

Входное устройство содержит схемы автоматической регулировки усиления и подавления внешних помех. При недостаточном уровне сигнала (ниже нескольких милливольт) измерения прекращаются, и показания счетчика сбрасываются.

Формирующее устройство создает последовательность кратковременных или прямоугольных импульсов, фронт которых совпадает с прохождением входных колебаний через нулевые фазы. Если в устройстве содержится компаратор, то вблизи нулевого уровня сигнала помехи могут вызвать ложное срабатывание, в результате частота будет измерена с завышением. Если формирователем служит триггер Шмидта, то в результате гистерезиса фаза сигнала измеряется с ошибкой, которая тем выше, чем меньше амплитуда входного сигнала по отношению к величине порога гистерезиса. Если амплитуда сигнала становится меньше этого порога, триггер не сработает, произойдет потеря импульса, результат измерения будет занижен. Для преодоления этих недостатков служат устройства автоматической регулировки уровня (АРУ), ждущие мультивибраторы, ограничивающие минимальный период следования счетных импульсов, полосовые фильтры и иные частотно-зависимые и нелинейные схемы, располагающиеся во входном устройстве. Поскольку подобные устройства могут эффективно работать лишь в ограниченных частотных интервалах, в частотомерах применяется переключение диапазонов измерения, при которых меняются частотно-зависимые цепи входного устройства.

Делитель частоты следования импульсов служит для уменьшения частоты импульсов в целое число раз. Для этих целей используют цифровые счетчики.

Устройство управления формирует прямоугольный строб-импульс, длительность которого  $T_C$  равна целому числу периодов опорной частоты. Эта длительность определяет время счета. По окончании счета устройство управления обеспечивает индикацию накопленного результата на время, достаточное для ее визуального считывания (обычно это время доступно для регулирования).

Так как прибор измеряет усредненное значение частоты, то точность измерения растёт с увеличением  $T_C$

Селекторный каскад управляет строб-импульсом. При его поступлении на время  $T_C$  открывается путь счетным импульсам на вход счетчика. Общее число импульсов  $N_X$ , прошедших через селекторный каскад, равно

$$N_X = f_R \cdot T_C.$$

Декадные счетчики осуществляют счет поступающих импульсов. Результат измерения представлен по окончании цикла в виде накопленного двоично-десятичного кода.

Дешифратор совместно с цифровым индикатором осуществляет преобразование кода счетчиков в визуально наблюдаемые числа десятичной системы счисления.

Типовая базовая схема содержит все перечисленные элементы, соединенные таким образом, чтобы в автоматическом режиме осуществлялся подсчет количества импульсов за интервал, сформированный из импульсов образцовой частоты [3, 4]. Эта схема может быть изменена с учетом некоторых дополнительных замечаний [5, 6].

Селекторный каскад может не присутствовать в чистом виде, а формируемый строб при этом поступает непосредственно на управляемые входы счетчиков [5, 6]. Если применены синхронные счетчики, то такой способ позволяет исключить систематическую погрешность, порождаемую тем, что длительность счетных импульсов конечна.

На выходе счетчика, подсчитывающего импульсы измеряемой частоты, целесообразно установить регистр, в который осуществляется перезапись результата измерения. В этом случае по окончании одного цикла измерения частотомер с минимальной временной задержкой, требуемой для перезаписи, перезапускается на следующий цикл, а на индикацию постоянно поступает результат последнего завершенного измерения. В ряде случаев это более удобно для оператора, и, кроме того, наличие регистра упрощает обмен с другими устройствами, например, выдачу результата на компьютер, осуществляющий вторичную обработку данных.

При рассмотренном принципе действия схеме длительность строб-импульса строго фиксирована и не зависит от периода измеряемой частоты. Как правило, в единицу времени укладывается не строго целое число периодов измеряемой частоты. Неучтенная часть периода порождает погрешность измерения, которая тем выше, чем ниже частота в сравнении с образцовой частотой  $f_R$ . Для повышения точности измерения следует увеличить время измерения до некоторого числа единиц времени, так например, если время измерения составляет 10 с, то погрешность измерения равна 0,1 Гц. За 100 с мы получим измерение с погрешностью 0,01 Гц и так далее. Увеличение  $T_C$  приводит к снижению

быстродействия прибора. Нестабильность  $T_C$  (за счет нестабильности  $f_R$ ) не может быть скомпенсирована увеличением времени измерения. Этот метод повышения точности недостаточно эффективен, однако дает наиболее простой алгоритм и поэтому применяется в серийных частотомерах.

Если измеряемая частота невелика, для измерения ее значения с некоторой относительной точностью требуемое для этого время осреднения может оказаться слишком большим. В этом случае измеряется не частота, а период, т.е. длительность между двумя последовательными пересечениями сигналом нулевого уровня. Указанный временной интервал измеряется в единицах периодов высокой частоты, которые укладываются на его протяжении. При фиксированной частоте опорного сигнала точность этого метода тем выше, чем больше длительность измеряемого периода. Точность измерения также может быть повышена, если измерять суммарную длительность некоторого целого числа периодов с последующим пересчетом.

С развитием вычислительной техники стало возможным применение более сложных, но и более эффективных методов измерения частоты. Рассмотрим один из них. Алгоритм измерения за  $N$  секунд может быть следующим:

Сигнал измеряемой частоты  $f_X$  преобразуется в импульсный. С первым фронтом полученного импульсного сигнала запускается отсчет времени: с помощью импульсов сигнала опорной частоты  $f_R$ , подаваемых на счетчик, отмеряется интервал  $N$  секунд, одновременно другим счетчиком подсчитывается количество импульсов, сформированных от измеряемого сигнала.

По истечении  $N$  секунд (т.е. после накопления  $N \cdot f_R$  импульсов) срабатывает триггер, подготавливающий срабатывание защелки, которое происходит от ближайшего очередного импульса частоты  $f_X$ . При этом продолжается подсчет опорных импульсов.

После срабатывания защелки определяются количество  $M_X$  целых периодов частоты  $f_X$  и соответствующая им суммарная длительность  $t_{\Sigma} = N_X / f_R$ , где  $N_X$  - число периодов опорной частоты,  $1/f_R$  - длительность одного периода.

Измеряемая частота определяется из соотношения

$$f_X = f_R \cdot M_X / N_X.$$

Полученный отсчет частоты приписывается середине полученного суммарного временного интервала.

Абсолютная погрешность измерения временного интервала за счет метода измерения в этом случае фиксирована и тем меньше, чем выше опорная частота  $f_R$  и чем больше время осреднения  $N$ .

Данная методика дает удовлетворительные результаты, если выполняются следующие условия:

1. Изменения измеряемой частоты за время осреднения незначительны в сравнении с требуемой точностью измерения.

2. Нестабильность опорной частоты незначительна.

### 3. ПОНЯТИЕ ТЕКУЩЕЙ ЧАСТОТЫ

Указанные методы измерения частоты дают лишь осредненный за некоторое время результат, при этом отсутствует информация о том, как ведет себя частота на коротких временных отрезках. В данном случае частота определена как количество выбросов данного сигнала за фиксированный (как правило, нулевой) уровень. Это понятие не совсем соответствует тому, что принято понимать под частотой сигнала. К примеру, если представить гармонический сигнал частоты  $F_1$ , на который накладывается импульсная помеха в виде случайного числа коротких импульсов некоторой амплитуды, то количество выбросов за нулевой порог в единицу времени увеличится, однако, как правило, нас интересует значение самой частоты  $F_1$ , а не получаемая интегральная оценка. При этом все мешающие измерению факторы рассматриваются как помехи и для устранения их влияния предусматриваются специальные меры: фильтрация, введение порогов срабатывания, частотно-зависимых цепей, устраняющих многократное срабатывание и т.д. В спектре сигнала наличие помехи может быть различимо по частотному диапазону (в этом случае фильтрация является достаточной мерой) либо неразличимо. В последнем случае никакими методами нельзя отличить сигнал от шума, поэтому приходится измерять результат их суперпозиции и учитывать расхождение результата с реальным значением в виде погрешности измерения.

В радиотехнике узкополосный сигнал часто представляют в виде проекции на действительную ось вращающегося с некоторой скоростью вектора:

$$U(t) = A(t)e^{j(\omega t + \phi)} = A(t)e^{j\phi(t)}, \quad (1)$$

где  $\phi(t)$  - фаза,  $A(t)$  - амплитуда сигнала.

Это представление позволяет ввести понятие "текущей частоты" как производной фазы по времени, то есть непрерывной функции от времени, которую можно представить как изменение значения скорости вращения указанного вектора во времени. При этом аддитивную помеху, накладываемую на сигнал, можно трактовать как некоторый добавочный шумовой вектор, а мультипликативную – как модуляцию длины  $A(t)$  этого вектора.

При фиксированном значении  $A(t) = A = const$  фаза может быть строго определена. Оказывается, что если ширина спектра сигнала много меньше его среднего значения, то и в этом случае можно достаточно строго разграничить девиации амплитуды и девиации фазы.

В частности, можно трактовать узкополосный сигнал как текущее значение одной из координат в прямоугольной системе, а также указать на имеющееся ограничение (узкая полоса огибающей), позволяющее восстановить недостающую координату. Далее следует осуществить переход из прямоугольной системы координат для вектора  $U(t)$  в полярную, то есть определить длину этого вектора и угол его поворота.

Для сигнала вида:

$$U(t) = A(t)e^{j(\omega t + \phi)} = X(t) + jY(t), \quad (2)$$

$$X(t) = \operatorname{Re}\{U(t)\} = A(t) \cos(\omega t + \phi), \quad (3)$$

$$Y(t) = \operatorname{Im}\{U(t)\} = A(t) \sin(\omega t + \phi). \quad (4)$$

Это означает, что недостающую координату разложения в прямоугольной системе можно получить применением фазовращателя. Такая операция возможна, если фазовращатель не вносит существенного искажения в вид временной функции  $A(t)$ , для чего и требовалось указанное ограничение. Для полной системы координат  $X(t)$ ,  $Y(t)$  имеют место очевидные тригонометрические соотношения:

$$A^2(t) = X^2(t) + Y^2(t), \quad (5)$$

$$\phi(t) = \omega t + \phi = \operatorname{arctg} \frac{X(t)}{Y(t)}. \quad (6)$$

Кроме того, имеет место менее очевидное, но легко проверяемое соотношение, справедливое и в том случае, если частота медленно меняется во времени:

$$\omega(t) = A^{-2}(t) \left[ X(t) \frac{dY(t)}{dt} - Y(t) \frac{dX(t)}{dt} \right]. \quad (7)$$

Действительно,

$$dX(t) / dt = \omega(t) A(t) \cos(\omega t + \phi),$$

$$dY(t) / dt = \omega(t) A(t) \sin(\omega t + \phi),$$

и подстановкой этих значений в предыдущее соотношение получаем тождество.

### 4. МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ ЧАСТОТЫ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ

Измерения текущей частоты осуществляются со следующими целями:

1. Для формирования сигнала, пропорционального первой производной по времени от изменения фазы принятого по оптическому каналу высокочастотного сигнала (в дальнейшем – информационного сигнала) относительно сигнала опорной частоты (в дальнейшем – гетеродинного сигнала). В случае, когда

постоянная составляющая значения фазы и ее знак не имеют значения, разделение сигналов на информационный и гетеродинный носит условный характер.

2. Для измерения величины фазового сдвига между информационным и гетеродинным сигналами.

Трудности обработки состоят в большом диапазоне девиаций фазы. Характерные технические требования к устройству предполагают диапазон изменения фазы – кратковременный (в области звуковых частот) менее  $2\pi$ , долговременный (на частоте  $1 \text{ Гц}$  и ниже) до  $2\pi/c$  без ограничения динамического диапазона. Рабочая полоса (полоса равномерного пропускания разностной частоты  $\omega = d\varphi/dt$ ) обычно соответствует звуковому диапазону частот: от  $20 \text{ Гц}$  до  $3 \text{ кГц}$ .

Принцип действия измерительной аппаратуры основан на технике обработки узкополосных случайных процессов с помощью преобразований Фурье и Гильберта.

Под понятием узкополосного сигнала понимают сигнал, преобразование Фурье которого концентрируется около частоты, удаленной от начала координат [7].

Если узкополосный сигнал имеет вид:

$$x(t) = u(t) \cos(2\pi f_0 t + \theta), \quad (8)$$

причем  $u(t)$  – низкочастотная огибающая, то этот сигнал можно представить, как проекцию на ось абсцисс вектора в комплексной плоскости, длина которого равна  $u(t)$ , а скорость вращения против часовой стрелки равна  $\bar{\omega}_0 = 2\pi f_0$ .

В обработке сигналов широко применяется понятие аналитического сигнала [7], соответствующего вещественному узкополосному сигналу  $x(t)$ . Аналитический сигнал – это комплексный сигнал, который образуется, если к вещественному сигналу  $x(t)$  добавить в качестве мнимой части его преобразование Гильберта:

$$\psi(t) = x(t) + j\chi(t). \quad (9)$$

Здесь Гильбертово преобразование определено парой преобразований (10) и (11):

$$x(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\chi(s)}{s-t} ds, \quad (10)$$

$$\chi(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(s)}{s-t} ds. \quad (11)$$

Для сигнала вида (9) под огибающей понимается модуль аналитического сигнала, равный корню квадратному из суммы квадратов, что совпадает с понятием огибающей узкополосного сигнала в радиотехнике. Фаза сигнала (9) характеризует текущее значение угла поворота вектора  $\psi(t)$  на комплексной плоскости. Более широко используется производная фазы по времени, называемая

мгновенной частотой, и определяемая следующим образом:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \text{Im} \left[ \frac{d}{dt} \ln \psi(t) \right] = \frac{1}{2\pi} \text{Im} \left[ \frac{d\psi(t)/dt}{\psi(t)} \right] =$$

$$= \frac{1}{2\pi} \text{Im} \left[ \frac{d\chi(t)}{dt} x(t) - \frac{dx(t)/dt}{dt} \chi(t) \right]. \quad (12)$$

Для получения эквивалентного низкочастотного представления сигнала, осуществляется простое сдвигание преобразования Фурье от  $\psi(t)$  так, чтобы оно оказалось сцентрированным около нулевой частоты и представляло собой низкочастотный сигнал.

При этом по определению полагают

$$\Gamma(f) = \psi(f + f_0), \quad (13)$$

так что

$$\gamma(t) = \psi(t) \exp(-j2\pi f_0 t). \quad (14)$$

Комплексное представление является прямым развитием символического метода, позволяющего представить синусоидальные колебания комплексными числами. Сигнал  $\gamma(t)$  называется комплексной огибающей сигнала  $x(t)$ . Согласно (14) узкополосный сигнал следующим образом выражается через вещественную и мнимую части  $\gamma(t)$ :

$$x(t) = u(t) \cos(2\pi f_0 t) - v(t) \sin(2\pi f_0 t), \quad (15)$$

где  $\gamma(t) = u(t) + jv(t)$ . Вещественные низкочастотные сигналы  $u$  и  $v$  называются соответственно синфазной и квадратурной компонентами узкополосного сигнала. Очевидно, огибающая этого сигнала есть просто модуль комплексного числа и не зависит от выбора частоты  $f_0$ :

$$|\gamma(t)| = \sqrt{u^2(t) + v^2(t)}. \quad (16)$$

Частотный демодулятор, таким образом, содержит высокочастотный (ВЧ) и низкочастотный (НЧ) узлы. Перенос спектра из ВЧ на нулевые частоты выполняется в два этапа – ВЧ узел служит для переноса сигнала на промежуточную частоту и для одного из сигналов при этом получается также квадратурная компонента, НЧ узел переносит спектр на нулевые частоты с получением синфазной и квадратурной компонент сигнала разностной частоты.

ВЧ узел содержит два канала, преобразующих сигнал из вида (8) в два сигнала вида:

$$x_1(t) = u(t) \cos(2\pi f_1 t), \quad (17)$$

$$x_2(t) = v(t) \sin(2\pi f_1 t). \quad (18)$$

При этом осуществляет перенос спектра сигнала из ВЧ  $f_n$  на промежуточную частоту  $f_1$  с одновременным разложением на синфазную  $x_1(t)$  и квадратурную компоненты  $x_2(t)$ . Для

второго канала получение квадратурной компоненты не требуется.

### 5. ПРАКТИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ ЧАСТОТЫ

Высокочастотный узел (Рис. 1) содержит перемножители с усиливающими фильтрами НЧ на выходах, а также генератор для получения когерентной и квадратурной компонент гетеродинного сигнала. Для снижения зависимости чувствительности системы от уровня сигнала на входе применены усилители AD603AR с автоматической регулировкой уровня (в двухкаскадном включении).

НЧ узел определяет мгновенную частоту аналитического сигнала в соответствии с уравнением (12). Низкочастотный узел (Рис. 2) переносит спектр сигнала на нулевую несущую и реализует уравнение (12), с допущением:

$$x(t) = x_1(t); \chi(t) = x_2(t) \quad (19)$$

Выходной фильтр НЧ устраняет продукты за пределами интересующей нас полосы частот (например, 3 кГц). Далее сигнал поступает в компьютер, где сигнал интегрируется для восстановления спектра в терминах фазового шума.

Переходы фазы через кратные значения  $\varphi_i = \pm 2\pi \cdot i$  или иные точки в такой системе не вызывают скачков выходного сигнала (что подтверждено экспериментально).

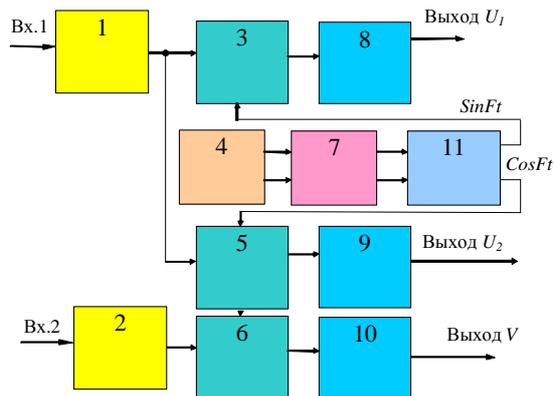


Рис. 1. ВЧ узел формирования гильбертовых пар: 1, 2 – усилитель с АРУ, 3, 5, 6 – перемножитель на AD835JN, 4 – генератор 10 МГц, 7 – регулировка уровня, 8, 9, 10 – фильтр НЧ, 11 – двухканальный фильтр промежуточной частоты (ПЧ)

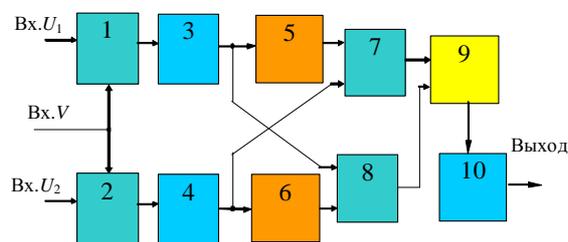


Рис. 2. Детектор мгновенной разностной частоты: 1, 2 – перемножитель, 3,4 фильтр НЧ (активный,  $F < 10$  кГц), 5, 6 – дифференцирующий усилитель, 7,8 – перемножитель, 9 – дифференциальный усилитель, 10 – фильтр НЧ (активный,  $F < 3$  кГц)

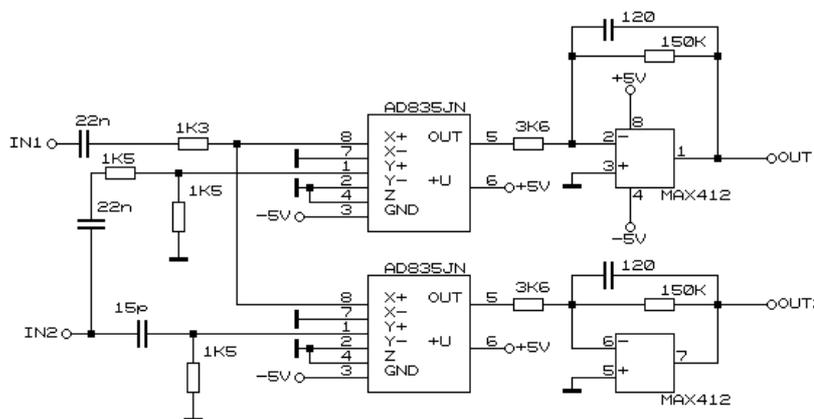


Рис. 3. Входная часть детектора мгновенной разностной частоты на основе аналоговых перемножителей

### 6. АППАРАТУРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТЕКУЩЕЙ ЧАСТОТЫ И РАЗНОСТИ ФАЗ

Рассмотрим задачу фазовой демодуляции, т.е. формирования сигнала, пропорционального разности фаз двух сигналов равной частоты. Эта задача смыкается с задачей частотной демодуляции, поскольку частота может быть определена как производная фазы по времени.

Частотный демодулятор (Рис. 1), таким образом, содержит высокочастотный узел,

который осуществляет перенос спектра сигнала из высоких частот в нулевые с одновременным восстановлением квадратурной компоненты, и низкочастотный узел, определяющий мгновенную частоту аналитического сигнала в соответствии с уравнением (15).

Высокочастотный узел содержит два перемножителя с усиливающими фильтрами НЧ на выходах, а также фазовращатель, служащий для получения квадратурной компоненты гетеродинного сигнала. С этой целью фазовращатель должен обеспечить фазовый

сдвиг  $90^\circ$  на частоте сигнала. Коэффициент преобразования пассивного  $RC$  фазовращателя при этом равен 0,5. Коэффициенты усиления обоих трактов должны быть строго одинаковы, поэтому во втором канале применяется выравнивающий делитель [10].

Низкочастотная часть схемы представляет собой частотный детектор, который применяется в системах автоподстройки частоты, например, в доплеровском измерителе скорости [4, 5, 7]. Его входными сигналами являются когерентная и квадратурная компоненты гильбертова сигнала разностной частоты, а выходной сигнал в этом случае пропорционален мгновенной частоте, умноженной на произведение амплитуд входных сигналов (если они имеют одинаковую амплитуду, в качестве множителя получаем квадрат этой величины). Это имеет глубокий смысл для доплеровских измерений, поскольку по своей природе доплеровский сигнал состоит из случайных импульсов (вспышек), огибающая которых повторяет форму пучка, а частота заполнения несет информацию о скоростях отдельных частиц. При этом величина квадрата амплитуды характеризует энергию сигнала, и, таким образом, вводится критерий правдоподобия для зашумленного сигнала. Поскольку для получения гильбертовой пары также применены линейные перемножители, выходной сигнал пропорционален амплитуде в четвертой степени, что существенно сужает динамический диапазон устройства и затрудняет работу с ним. Тем не менее, такой прибор может успешно использоваться при медленных изменениях амплитуды. Для этого достаточно ввести систему АРУ (автоматической регулировки уровня), или ручную регулировку.

В других применениях, например, в большебазовом интерферометре, внесение квадратичного амплитудного критерия может быть нежелательно. Интуитивное желание разработчика подсказывает простейший выход: введение усилителя-ограничителя на входах устройства. Такой решение, однако, следует признать неверным. Действительно: если сигнал ограничивается существенно, например, в  $K$  раз (это означает, что неограниченный сигнал имел бы амплитуду в  $K$  раз большую, чем ограниченный), то эффективная величина шума (отношение действующего значения шума к действующему значению первой гармоники сигнала) возрастает в  $K$  раз (в предположении, что отношение сигнала к шуму превышает  $K$ , и поэтому шум не ограничивается). Если сигнал не доходит до ограничения, действие ограничителя нивелируется.

Правильным было бы стремиться к достижению линейности операции выделения мгновенной частоты по отношению к амплитуде входного сигнала. То есть желательно, чтобы

выходной сигнал был пропорционален мгновенной частоте, умноженной на амплитуду входного сигнала (корректнее – на корень квадратный из произведения амплитуд входных сигналов).

Устройство на *Рис. 2* отличается введением ограничителя только в одно (опорное) плечо обрабатываемого тракта по каждому сигналу. С целью достижения равнозначности входов применены два фазовращателя на  $45^\circ$ . Выходной сигнал такой системы пропорционален мгновенной частоте, умноженной на произведение амплитуд входных сигналов.

На *Рис. 1–2*, таким образом, показана универсальная система для частотных и фазовых измерений. В ней формируются сигналы когерентной и квадратурной составляющей гильбертовой пары сигналов на промежуточной частоте, это позволяет восстановить мгновенную частоту в виде аналогового сигнала, а интеграл от нее является фазой.

Указанные принципы целесообразно реализовать на цифровой технике. Современные АЦП обладают быстрым действием свыше 200 МГц при разрядности не менее 14. Это позволяет обрабатывать сигналы в полосе до 10 МГц, получая не менее 20 отсчетов на период, что более чем достаточно для частотных и фазовых измерений [10–33].

## 7. МОДЕЛЬ ВЫХОДНОГО СИГНАЛА ГЕНЕРАТОРА: ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Входной сигнал идеального (без шумов и дрейфов) сигнала можно моделировать синусоидой:

$$V(t) = V_0 \cdot \sin 2\pi\nu_0 t, \quad (20)$$

где  $V_0$  и  $\nu_0$  – номинальные значения соответственно амплитуды и частоты ( $\omega = 2\pi\nu_0$ ). Для реальных генераторов модель должна учитывать существующие отклонения  $V_0$  от  $\nu_0$ . Можно воспользоваться следующим выражением:

$$V(t) = [V_0 + \varepsilon(t)] \sin[2\pi \cdot \nu_0 t + \Phi(t)], \quad (21)$$

в котором  $\varepsilon(t)$  – случайный процесс, описывающий флуктуации амплитуды относительно  $V_0$  и называемый также амплитудным шумом. Аргументом гармонической части является величина, которую можно назвать обобщенной фазой случайного сигнала  $V(t)$ , эта величина содержит детерминированную часть, линейно нарастающую со временем  $\omega t = 2\pi\nu_0 t$ , и случайную составляющую  $\Phi(t)$ , описывающую фазовую модуляцию, которую можно связать с отклонениями частоты, поскольку частота и фаза взаимно определены следующим образом: мгновенное значение частоты равно скорости изменения фазы во времени, поделенной на  $2\pi$ .

Предполагая амплитудный шум пренебрежимо малым, для исследования случайных флуктуаций фазы и частоты можно воспользоваться следующей упрощенной моделью:

$$V(t) = V_0 \sin[2\pi \cdot v_0 t + \varphi(t)]. \quad (22)$$

По определению мгновенное значение частоты равно

$$v(t) = \frac{d}{2\pi \cdot dt} [2\pi \cdot v_0 t + \varphi(t)] = v_0 + \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (23)$$

Это соотношение можно переписать в виде

$$v(t) = v_0 + \Delta v(t), \quad (24)$$

причем

$$\Delta v(t) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\varphi(t)}{dt} \quad (25)$$

описывает случайный процесс, моделирующий частотный шум. Для высокочастотных генераторов, конечно,

$$|\Delta v(t)| \ll v_0 \quad (26)$$

на протяжении всего рассматриваемого промежутка времени  $t$ .

Полезным параметром служит мгновенное относительное (или нормированное) отклонение частоты  $y(t)$ , определяемое в виде

$$y(t) = \Delta v(t) / v_0. \quad (27)$$

Интерес к такой безразмерной величине связан с тем, что она остается неизменной при операциях умножения и деления частоты, выполняемых во многих практических системах (в предположении отсутствия шумов в умножителях и делителях). Кроме того, она облегчает сравнение источников с разными номинальными значениями частот. Иногда целесообразно ввести другой параметр, который описывает фазу в единицах времени и иногда называется «фазовым временем»:

$$x(t) = \frac{\varphi(t)}{2\pi \cdot v_0}. \quad (28)$$

Величина  $x(t)$  выражает мгновенное отклонение по времени сигнала часов, синхронизируемых генератором с частотой  $v(t)$ . Справедливо следующее выражение:

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt}. \quad (29)$$

## 8. ОПИСАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ЧАСТОТЫ ВО ВРЕМЕННОЙ ОБЛАСТИ

Поскольку нестабильности генераторов представляют собой изменения во времени рассматриваемых величин (фазы и частоты), нестабильность можно охарактеризовать определенной мерой этих изменений на заданном интервале времени  $\tau$ . Поскольку речь идет о случайных явлениях, применяемые показатели выражаются через статистические параметры. Эти величины обычно

представляются в виде зависимости от интервала усреднения  $\tau$ , который может изменяться в широких пределах, скажем, от миллисекунд до нескольких суток, месяцев, лет.

Мгновенная частота генератора  $v(t)$ , определяемая выражением (23), не доступна для наблюдения, так как любой метод измерения частоты обязательно связан с конечным интервалом времени, на протяжении которого производится измерение. Так, например, цифровой частотомер отсчитывает число периодов  $n_k$  входного сигнала, начиная от  $t_k$  на протяжении интервала времени  $\tau$ , который задается его хронометрирующим устройством, работающим от опорного генератора.

Поэтому более полезной величиной, непосредственно связанной с экспериментальным результатом, служит среднее значение  $v(t)$  на временном интервале  $\tau$ , начинающемся в момент  $t_k$ , т.е.

$$\langle v(t) \rangle_{t(k), \tau} = v_0 + \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} \Delta v(\theta) d\theta = \frac{n_k}{\tau}. \quad (30)$$

Широко используется нормированная величина  $\bar{y}_k$ , определяемая следующим образом:

$$\bar{y}_k = \frac{1}{\tau} \int_{t_k}^{t_k + \tau} y(\theta) d\theta, \quad (31)$$

с помощью которой находится

$$\langle v(t) \rangle_{t(k), \tau} = v_0 (1 + \bar{y}_k) = n_k / \tau. \quad (32)$$

Используя уравнения (25) и (27), можно показать, что

$$\bar{y}_k = \frac{\varphi(t_k + \tau) - \varphi(t_k)}{2\pi \cdot v_0 \tau}. \quad (33)$$

Числитель представляет собой набег по фазе, накопленный за время от  $t_k$  до  $t_k + \tau$  и называемый также первым приращением фазы или разностью фазы первого порядка.

Поскольку  $\bar{y}_k$  легко связать с экспериментальными результатами, получаемыми с помощью счетных методов, эта величина используется для определения параметром нестабильности во временной области. Точнее, каждое отдельное измерение длительностью  $\tau$  дает одну выборку  $\bar{y}_k$ ; для того, чтобы статистическая обработка могла дать имеющий смысл показатель нестабильности на интервале  $\tau$ , необходимы многократные изменения  $\bar{y}_k$ .

### 9. ИСТИННАЯ ДИСПЕРСИЯ

Из-за случайных флуктуаций  $y(t)$  в реальных генераторах повторные измерения  $\bar{y}_k$  дают численные значения со случайным разбросом, т.е. получаются выборки некоторой случайной величины. Статистическая характеристика рассеяния  $\bar{y}_k$ , соответствующая каждому значению  $\tau$ , дает некоторый показатель нестабильности частоты во временной области на интервале  $\tau$ . Для оценки меры рассеяния в статистике используется дисперсия  $\sigma^2$  или стандартное отклонение  $\sigma$ . В предположении, что  $y(t)$ , а следовательно и  $\bar{y}_k$ , имеет нулевое среднее, дисперсия будет равна среднему квадрату  $\bar{y}_k$ :

$$\sigma^2[\langle y_k \rangle] = \langle \bar{y}_k^2 \rangle. \quad (34)$$

Угловые скобки  $\langle \cdot \rangle$  означают либо статистическое среднее, вычисляемое по бесконечному числу выборок в заданный момент времени  $t_k$ , либо среднее по бесконечному временному интервалу, вычисляемое по одной выборке  $y(t)$ . При этом предполагается эргодичность  $y(t)$ , т.е. принимается гипотеза, что осреднение по времени эквивалентно осреднению по ансамблю. Так как это предусматривает бесконечное число выборок или бесконечную длительность, такая дисперсия представляет собой идеализацию и часто называется истинной дисперсией. Она будет обозначаться  $I^2(\tau)$ , чтобы подчеркнуть, что это показатель нестабильности на временном интервале  $\tau$ .

Для стационарных частотных флуктуаций справедливы следующие предельные соотношения:

$$\lim_{\tau \rightarrow 0} I^2(\tau) = \sqrt{\langle y(t) \rangle}, \quad (35)$$

$$\lim_{\tau \rightarrow \infty} I^2(\tau) = 0, \quad (36)$$

Первый предел соответствует идеальным измерениям мгновенной частоты при  $\tau \rightarrow 0$  и, следовательно, равен среднеквадратическому значению (т.е. стандартному отклонению)  $y(t)$ . Второе предельное соотношение показывает, что при  $\tau \rightarrow \infty$  стационарные флуктуации полностью усредняются до нуля и разброс результатов должен равняться нулю. Ясно, что ни один из результатов не доступен для наблюдения. Убывание  $I^2(\tau)$  по мере увеличения  $\tau$  свидетельствует лишь о лучшем усреднении стационарных случайных флуктуаций.

### 10. ДВУХВЫБОРОЧНАЯ ДИСПЕРСИЯ

Основываясь на работе Аллена [8], подкомитет ИИЭИР по стабильности частоты предложил следующий показатель нестабильности во временной области:

Используется среднее значение выборочной дисперсии при числе выборок  $N = 2$ , при этом свободный промежуток принимается равным нулю. Получающийся показатель записывается:

$$\langle \sigma_y^2(2, \tau, \tau) \rangle = \left\langle \sum_{i=1}^2 \left( \bar{y}_i - 0,5 \sum_{j=1}^2 \bar{y}_j \right)^2 \right\rangle. \quad (37)$$

Для этой величины широко используется сокращенное обозначение  $\sigma_y^2(\tau)$ :

$$\sigma_y^2(\tau) = 0,5 \left\langle \left( \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \right)^2 \right\rangle. \quad (38)$$

Она известна как дисперсия Аллена или парная дисперсия. Выражение (38) прямо следует из выражения (37):

$$\begin{aligned} \sigma_y^2(2, \tau, \tau) &= \left\langle \sum_{i=1}^2 \left( \bar{y}_i - 0,5(\bar{y}_1 + \bar{y}_2) \right)^2 \right\rangle = \\ &= \left\langle \left( 0,5\bar{y}_1 - 0,5\bar{y}_2 \right)^2 + \left( 0,5\bar{y}_2 - 0,5\bar{y}_1 \right)^2 \right\rangle = 0,5 \left\langle \left( \bar{y}_2 - \bar{y}_1 \right)^2 \right\rangle \end{aligned}$$

На практике, например, в Институте Лазерной физики СО РАН, для получения объективной характеристики нестабильности частоты лазера используется следующий порядок измерения дисперсии Аллена.

1. Изготавливаются две одинаковые лазерные системы, частота излучения лазеров в которых соответственно  $\nu_1(t)$  и  $\nu_2(t)$ .

2. С помощью системы ФАПЧ к одному из лазеров (например, второму) привязывается третий лазер, который излучает на частоте  $\nu_3(t)$ , отличающейся от  $\nu_2(t)$  на частоту  $f_0(t)$ , служащую опорной для системы ФАПЧ:  $\nu_3(t) = \nu_2(t) + f_0(t)$ .

3. Излучения первого и третьего лазеров сбиваются, частота биений равна  $f_B(t) = \nu_3(t) - \nu_1(t) = \nu_2(t) - \nu_1(t) + f_0(t)$ .

4. Частота  $f_B(t)$  может быть измерена цифровым частотомером, абсолютные значения ее нестабильности равны статистической сумме абсолютных значений нестабильности частот обоих лазеров.

Если достоверно известно, что нестабильность одного лазера (например, первого) существенно (на порядок и более) выше, чем нестабильность другого (второго), то последней можно пренебречь. Если оба лазера абсолютно идентичны, можно считать обоснованной гипотезу о равном вкладе нестабильностей частот обоих лазеров в суммарную нестабильность, которая получается по правилу суммирования независимых случайных величин - т.е. результат суммиро-

вания равен корню квадратному из суммы квадратов составляющих (и в корень из двух больше каждой составляющей). В этом случае для вычисления нестабильности одного из лазеров результат измерения следует разделить на корень из двух.

Кроме того, используется гипотеза об эргодичности процесса флуктуации частоты, а следовательно, о возможности замены осреднения по множестве осреднением по времени.

Пусть мы имеем  $2N$  выборки  $\bar{y}_k(t_i, \tau)$  осредненных за время  $\tau$  значений частоты на этом интервале, начинающемся в момент  $t_i$  и оканчивающемся в момент  $t_i + \tau$ . Мы можем получить  $N$  отсчетов отклонения частоты на двух следующих друг за другом интервалах  $[t_i, t_i + \tau]$  и  $[t_i, t_i + 2\tau]$ . Квадрат этой величины даст отсчет среднеквадратического отклонения:

$$\Delta \bar{y}^2(t_i, \tau) = [\bar{y}(t_i + \tau, \tau) - \bar{y}(t_i, \tau)]^2,$$

зависящий от времени осреднения  $\tau$ , времени начала первого измерения  $t_i$ . Для получения характеристики эргодического процесса абсолютное значение величины  $t_i$ , к которой относят полученную величину, не имеет значения, важно лишь, чтобы эти отсчеты были независимыми, а для этого достаточно, чтобы используемые временные интервалы не пересекались. Для замены операции статистического осреднения в уравнении (38) 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:

$$\langle \sigma_y^2(\tau, N) \rangle = \sum_{i=1}^N \Delta \bar{y}^2(t_i, \tau) / (N - 1). \quad (39)$$

Таким образом, аппаратная часть задачи сводится к получению  $2N$  отсчетов  $\bar{y}_i(\tau)$  частоты  $F_B(t)$ , которые позволяют вычислить значение  $\sigma_y^2(\tau, N)$ .

Строго говоря, для получения  $k$  значений параметров Аллена от различных величин  $\tau$  следует выполнить  $k$  экспериментов. Минимальное время, необходимое для получения каждого значения  $\sigma_y^2(\tau, N)$  равно  $2\tau_i N$ . Суммарное время оказывается весьма значительным.

На практике поступают следующим образом:

1. Получают столько  $M$  последовательных независимых отсчетов  $\bar{y}_k(\tau)$  на интервалах осреднения длительностью  $\tau$ , сколько возможно, при этом задержка

между следующими друг за другом временными интервалами должна быть строго нулевой.

2. Для величины  $\tau$  можно получить  $M/2$  значений функции  $\Delta \bar{y}_k^2(t_i, \tau)$  которые позволяют вычислить значение дисперсии Аллена по  $M/2$  выборкам -  $\sigma_y^2(\tau, M/2)$ .
3. Для величины  $n\tau$  можно получить  $M/2n$  значений функции  $\Delta \bar{y}_k^2(t_i, \tau)$  и вычислить значение дисперсии Аллена по  $M/2n$  выборкам -  $\sigma_y^2(\tau, M/2n)$ . С этой целью каждые  $n$  отсчетов частоты усредняются, результат приписывается интервалу длительностью  $n\tau$ :

$$\bar{y}(t_i, n\tau) = \sum_{i=1+jn-n}^{jn} \bar{y}(t_i + \tau, \tau) / n, j = 1, \dots, M/n \quad (40)$$

Если  $M$  не делится на  $n$  без остатка, то остаточные отсчеты  $\bar{y}(t_i, \tau)$  отбрасываются. Оценка дисперсии Аллена за время  $n\tau$  вычисляется, если строго корректно заменять усреднение по множеству на усреднение по времени, следующим образом:

$$\langle \sigma_y^2(n\tau, M/2n) \rangle = \sum_{j=1}^{M/2n} \Delta \bar{y}^2(t_j, n\tau) / (M/2n - 1) \quad (41)$$

При этом берутся не пересекающиеся интервалы, следующие один за другим, на которых измеряется средняя частота. В статье Рютмана [9] предлагается иной способ, а именно: вычисляются и используются приращения  $\Delta \bar{y}(t_i, \tau)$  на каждом интервале длительностью  $\tau$  относительно предыдущего. Тогда при  $M$  отсчетах значения  $\bar{y}(t_i, n\tau)$  будем иметь  $M - 1$  отсчет разностей  $\Delta \bar{y}(t_j, \tau)$ , а дисперсия Аллена определяется в соответствии с выражением:

$$\langle \sigma_y^2(n\tau, m) \rangle = 0,5 \sum_{i=1}^{m-1} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 / (m - 1) \quad (42)$$

Эта величина сама является случайной, и ее дисперсия (т.е. дисперсия дисперсии) может быть использована для вычисления границ ошибки на графике зависимости  $\sigma_y^2$  от  $\tau$ .

## 11. О ТЕРМИНАХ ТОЧНОСТИ И ПОГРЕШНОСТИ ЧАСТОТЫ

Для характеристики стабильности частоты в научных исследованиях используется терминология, связанная с отклонением формируемого значения частоты от самого себя. Если генератор изначально формирует требуемую частоту с ошибкой, но это значение будет воспроизводиться сколь угодно долго со сколь угодно высокой точностью,

нестабильность частоты такого идеального генератора равна нулю, хотя погрешность формирования частоты не равна нулю по определению, т.е. по условию, сформулированному нами в отношении этого генератора.

Если частота генератора линейно нарастает или линейно убывает с постоянной скоростью изменения, то уход частоты за равные интервалы времени будет одинаковым. Дисперсия этого ухода частоты будет равна нулю. Следовательно, параметр Аллена будет также равен нулю. Показатель стабильности (правильнее его называть показателем нестабильности) этой частоты будет равен нулю, т.е. это говорит о высшей и недостижимой на практике стабильности.

Если параметр Аллена равен  $1 \cdot 10^{-18}$  (за 1000 с) [1, 2], это говорит лишь о том, что среднеквадратичный разброс изменения частоты за 1000 с не превышает указанную величину. Иными словами, допустим, что измеренное значение частоты составляет изначально  $10^{-14}$  Гц, и через каждые 1000 с это значение увеличивается на 0,01 Гц. Само значение этого приращения не стабильно, оно может изменяться даже, например, в 2 раза в обе стороны, т.е. от 0,005 Гц до 0,02 Гц. Но среднеквадратичная нестабильность этого регулярного приращения равна 0,0001 Гц. Это даст указанную величину нестабильности, т.е. стандартное отклонение (корень из дисперсии) приращения частоты за 1000 с составит указанную долю, выражаемую единицей, деленной на десять в восемнадцатой степени. Из этого вовсе не следует, что погрешность формирования частоты составляет эту величину. На самом деле при указанных характеристиках среднее значение частоты, сформированной за первую тысячу секунд будет отличаться от среднего значения, сформированного за следующую тысячу секунд на величину, равную  $1 \cdot 10^{-16}$ , т.е. на два порядка больше. За десять тысяч секунд это значение уйдет на величину, равную  $1 \cdot 10^{-15}$ , т.е. на три порядка больше, за 100 000 с – на величину, на четыре порядка больше, и так далее. Кроме того, выбранное значение дрейфа частоты в данном случае для примера взято совершенно случайно. Наши рассуждения не изменились бы, если бы мы приняли, что уход частоты за тысячу секунд равен не 0,01 Гц, а 1 Гц или даже 10 Гц. В характеристику, называемую параметром Аллена, входит не сама величина ухода частоты, а ее статистический разброс, поэтому если даже уход был бы равен 100 Гц за 1000 с, но значение этого ухода воспроизводилось бы с указанной выше точностью, то все равно указанный параметр был бы равен  $1 \cdot 10^{-18}$  (за 1000 с). При этом нестабильность частоты за 1000 с на самом деле была бы в равна единице, деленной на десять в

двенадцатой степени, т.е. на шесть порядков хуже, чем формальный показатель.

На самом деле, разумеется, эта ситуация несколько надуманная. Невозможно представить, чтобы уход частоты был настолько стабилен, что разброс этой линейной характеристики был на шесть порядков меньше, чем собственно значение. Здесь лишь демонстрируется неидентичность используемых терминов, их относительно слабая связь между собой.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

В статье даны основные формулировки, используемые для описания стабильности частоты, объяснены методы соответствующих измерений, обоснованы выводы о сопоставимости различных показателей стабильности и точности формирования и измерения частоты, что также важно для фазовых измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Коляда Н.А. Волоконный фемтосекундный эрбиевый синтезатор частот стабилизированный по Nd:YAG/I2 оптическому стандарту частоты для мобильных метрологических систем. Автореферат дисс. на соис. уч. степ. к. ф.-м. н. по спец. «01.04.21 – Лазерная физика», Новосибирск, ИЛФ СО РАН, 2018 г. <http://www.laser.nsc.ru/download/Diss/Kolyada/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%20%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D0%B4%D0%B0%20%D0%9D.A.%20.pdf>
- [2] Коляда Н.А. Волоконный фемтосекундный эрбиевый синтезатор частот стабилизированный по Nd:YAG/I2 оптическому стандарту частоты для мобильных метрологических систем. Дисс. на соис. уч. степ. к. ф.-м. н. по спец. «01.04.21 – Лазерная физика», Новосибирск, ИЛФ СО РАН, 2018 г. <http://www.laser.nsc.ru/download/Diss/Kolyada/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D0%B4%D0%B0%20%D0%9D.%D0%90.pdf>
- [3] Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: В 2-х томах. Пер. с франц. М.: Мир, 1983. Т 1, 2.
- [4] Винокуров В.И., Каплин С.И., Петелин И.Г. Электрорадиоизмерения: Учеб. пособие для радиотехнич. спец. вузов. Под ред. В.И. Винокурова. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Высш. шк., 1986. - 351 с.: ил.
- [5] Жмудь В.А., Уткин Е.Н. Универсальный доплеровский частотомер. Приборы и техника эксперимента, 1989, № 4, с.100 - 102.
- [6] Zhmud V.A., Utkin E.N. General-Purpose Doppler Frequency Meter. Instruments and Experimental Techniques. 1990. Т. 32. № 4 РТ 1. Р. 844–847.
- [7] Френкс Л. Теория сигналов. Нью-Джерси, 1969 г. Пер. с англ., под ред. Д.Е. Вакмана - М., “Сов. радио”, 1974, 344 с.
- [8] Аллен Д.У. Статистические характеристики атомных стандартов частоты. Стабильность частоты: тематический выпуск ТИИЭИР, 1966, т.54, №2, с.132–142.

- [9] Рютман Ж. Характеристики нестабильности фазы и частоты сигналов высокостабильных генераторов: итоги развития за пятнадцать лет. ТИИЭИР, т.66, №9, 1978, с.70–102.
- [10] Жмудь В.А. Следящий процессор для обработки сигналов ЛДИС в режиме обратного рассеяния. Автометрия, 1986, №6, с.28–33.
- [11] Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A., Il'yanovich Yu.N., Semibalamut V.M., Fomin Yu.N. Detection of the Increment of an Instantaneous Phase in a Long-Base Laser Meter of Small Vibrations. Приборы и техника эксперимента. 2002. Т. 45. № 4. С. 97–100.
- [12] Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А. Метод повышения чувствительности лазерных виброметров. Автометрия. 2003. Т. 39. № 2. С. 43–47.
- [13] Воевода А.А., Жмудь В.А., Гончаренко А.М. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2010. № 1. С. 35–40.
- [14] Воевода А.А., Жмудь В.А., Гончаренко А.М. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 4. С. 25–32.
- [15] Бугров С.В., Жмудь В.А., Прохоренко Е.В., Гончаренко А.М. Методы и средства нановиброметрии. В сборнике: Актуальные проблемы электронного приборостроения материалы X Международная конференция: в 7 т.. 2010. С. 119–123.
- [16] Zhmud V., Liapidevskiy A. Real Time Digital Super-High Accuracy Vibrations Measurements: Methods, Devices and Mathematical Modeling for The Metrology. В сборнике: Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010. Сер. "Proceedings of the 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010" Phuket, 2010. С. 343–347.
- [17] Жмудь В.А., Воевода А.А., Гончаренко А.М. Многоканальный прецизионный быстродействующий частотомер. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 1. С. 73–82.
- [18] Borisov B.D., Goncharenko A.M., Vasiliev V.A., Zhmud V.A. Precise Measurements of High-Stable Lasers Radiation Frequency and Phase. В сборнике: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. Novosibirsk, 2002. P. 162–166.
- [19] Borisov B.D., Vasil'ev V.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Stability Estimation Technique of Frequency Standards. Автометрия. 2002. № 3. P. 104–112.
- [20] Жмудь В.А., Гончаренко А.М., Воевода А.А. Аттестация трехканального прецизионного быстродействующего частотомера. Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2005. № 2. С. 175–179.
- [21] Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. патент на изобретение RUS 2225012 19.04.2002
- [22] Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Прецизионный высокочастотный фазометр для измерений нановибраций. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 1 (55). С. 92–98.
- [23] Гончаренко А.М., Бугров С.В., Воевода А.А., Жмудь В.А. Метрологические испытания цифрового прецизионного фазометра. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2009. № 2 (56). С. 109–114.
- [24] Zhmud V.A., Prokhorenko E.V., Liapidevskiy A.V. The Problem Of Precision Fault-Tolerance Phase Measurements And Its Decision. В сборнике: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. С. 34–38.
- [25] Гончаренко А.М., Бугров С.В., Жмудь В.А. Мониторинг фазовых приращений прерывистого сигнала. Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Физика. 2007. Т. 2. № 1. С. 61–64.
- [26] Гончаренко А.М., Жмудь В.А., Воевода А.А., Авлилов С.А. Микропроцессорный прецизионный трехканальный высокоскоростной частотомер без "мертвого времени". Приборы и техника эксперимента. 2007. № 2. С. 78–83.
- [27] Жмудь В.А., Семибаламут В.М., Димитров Л.В. Повышение точности и надежности измерения разности фаз. Автоматика и программная инженерия. 2017. № 1 (19). С. 83–96.
- [28] Zhmud V.A., Goncharenko A.M. Modern Problems of High-Precision Measurements of the Phase Differences. В сборнике: 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 - Proceedings 13. 2016. С. 314–318.
- [29] Жмудь В.А., Воевода А.А., Семибаламут В.М., Гончаренко А.М., Бугров С.В. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. патент на изобретение RUS 2470312 28.09.2010.
- [30] Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А. Цифровой частотомер. Патент на изобретение RUS 2210785 13.07.2001
- [31] Жмудь В.А., Гончаренко А.М. Современные проблемы высокоточного измерения разностей фаз. В сборнике: Актуальные проблемы электронного приборостроения труды XII международной конференции: АПЭИ-2014. 2014. С. 221–225.
- [32] Жмудь В.А., Терешкин Д.О., Ляпидевский А.В., Захаров А.В., Гололобов В.И. Повышение быстродействия цифрового прецизионного фазометра. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2011. № 4 (66). С. 23–34.
- [33] Жмудь В.А., Гончаренко А.М. Прецизионный частотомер для фундаментальной метрологии. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2 (8). С. 74–81.
- [34] Zhmud V., Goncharenko A., Liapidevskiy A.V. Precision Frequency Meter for Basic Metrology and Displacement Measurements. В сборнике: Testing and Measurement: Techniques and Applications - Proceedings of the 2015 International Conference on

Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015 2015. P. 125–130.



**Денис Олегович Терешкин**, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор 15 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, лазерная физика, программные системы.  
E-mail: [todin.dirihle@gmail.com](mailto:todin.dirihle@gmail.com)



**Владимир Михайлович Семибаламут** – директор сибирского филиала Геофизической Службы СО РАН, кандидат физико-математических наук, автор более 100 научных статей и более 10 патентов..  
E-mail: [vladim28@yandex.ru](mailto:vladim28@yandex.ru)

Статья поступила 3 мая 2018 г.

## Modern Methods of Measuring Frequency and Phase in Real Time

D.O. Tereshkin, V.M. Semibalamut

Siberian Branch of Geophysical Survey SB RAS, Novosibirsk Russia  
V.M. Semibalamut

*Abstract:* Many research groups and engineering groups are engaged in frequency and phase measurements. The view on these issues is developing with some lag behind modern scientific and technical needs. There are many teams that use outdated ideas about such measurements; equipment that does not respond to needs continues to be produced in large batches, and which could easily be modified to modern scientific and technical measuring instruments. The erroneous interpretation of certain properties of frequency and phase measurements leads to ineffective organization of research, to unproductive expenditure of funds and time of research teams, to financing of developments that do not meet the goals set. This article is aimed at correcting such concepts as "accuracy", "error", "stability", "reproducibility", "non-reproducibility", "instability", and some others.

*Key words:* Frequency, phase, accuracy, error, reproducibility, instability, Allan parameter, dispersion, stability, non-reproducibility, frequency measurements, phase measurements

### REFERENCES

- [1] Kolyada N.A. Volokonnyy femtosekundnyy erbiyevyy sintezator chastot stabilizirovanny po Nd:YAG/12 opticheskomu standartu chastoty dlya mobil'nykh metrologicheskikh sistem. Avtoreferat diss. na sois. uch. step. k. f.-m. n. po spets. «01.04.21 – Lazernaya fizika», Novosibirsk, ILF SO RAN, 2018 g. <http://www.laser.nsc.ru/download/Diss/Kolyada/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%20%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D0%B4%D0%B0%20%D0%9D.A.%20.pdf>
- [2] Kolyada N.A. Volokonnyy femtosekundnyy erbiyevyy sintezator chastot stabilizirovanny po Nd:YAG/12 opticheskomu standartu chastoty dlya mobil'nykh metrologicheskikh sistem. Diss. na sois. uch. step. k. f.-m. n. po spets. «01.04.21 – Lazernaya fizika», Novosibirsk, ILF SO RAN, 2018 g. <http://www.laser.nsc.ru/download/Diss/Kolyada/%D0%94%D0%B8%D1%81%D1%81%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%9A%D0%BE%D0%BB%D1%8F%D0%B4%D0%B0%20%D0%9D.%D0%90.pdf>
- [3] Maks Zh. Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh: V 2-kh tomakh. Per. s frants. M.: Mir, 1983. T 1, 2.
- [4] Vinokurov V.I., Kaplin S.I., Petelin I.G. Elektroradioizmereniya: Ucheb. posobiye dlya radiotekhnich. spets. vuzov. Pod red. V.I. Vinokurova. - 2-ye izd., pererab. i dop. - M.: Vyssh. shk., 1986. - 351 s.: il.
- [5] Zhmud V.A., Utkin Ye.N. Universal'nyy doplerovskiy chastotomer. Pribory i tekhnika eksperimenta, 1989, № 4, s.100 - 102.
- [6] Zhmud V.A., Utkin E.N. General-Purpose Doppler Frequency Meter. Instruments and Experimental Techniques. 1990. T. 32. № 4 PT 1. P. 844–847.
- [7] Frenks L. Teoriya signalov. N'yu-Dzhersi, 1969 g. Per. s angl., pod red. D.Ye. Vakmana - M., "Sov. radio", 1974, 344 s.
- [8] Allen D.U. Statisticheskiye kharakteristiki atomnykh standartov chastoty. Stabil'nost' chastoty: tematicheskii vypusk TIEIR, 1966, t.54, №2, s.132–142.
- [9] Ryutman ZH. Kharakteristiki nestabil'nosti fazy i chastoty signalov vysokostabil'nykh generatorov: itogi razvitiya za pyatnadtsat' let. TIEIR, t.66, №9, 1978, s.70–102.
- [10] Zhmud V.A. Sledyashchiiy protsessors dlya obrabotki signalov LDIS v rezhime obratnogo rassseyaniya. Avtometriya, 1986, N6, s.28–33.
- [11] Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A., Il'yanovich Yu.N., Semibalamut V.M., Fomin Yu.N. Detection of the Increment of an Instantaneous Phase in a Long-Base Laser Meter of Small Vibrations. Pribory i tekhnika eksperimenta. 2002. T. 45. № 4. S. 97–100.
- [12] Goncharenko A.M., Vasil'yev V.A., Zhmud' V.A. Metod povysheniya chuvstvitel'nosti lazernykh vibrometrov. Avtometriya. 2003. T. 39. № 2. S. 43–47.
- [13] Voyevoda A.A., Zhmud' V.A., Goncharenko A.M. Fazometry dlya radiochastotnykh i lazernykh izmeriteley peremeshcheniy i vibratsiy. Nauchnyy

- vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2010. № 1. S. 35–40.
- [14] Voyevoda A.A., Zhmud' V.A., Goncharenko A.M. Fazometry dlya radiochastotnykh i lazernykh izmeriteley peremeshcheniy i vibratsiy. Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. № 4. S. 25–32.
- [15] Bugrov S.V., Zhmud' V.A., Prokhorenko Ye.V., Goncharenko A.M. Metody i sredstva nanovibrometrii. V sbornike: Aktual'nyye problemy elektronnoy priborostroyeniya materialy X Mezhdunarodnaya konferentsiya: v 7 t. 2010. S. 119–123.
- [16] Zhmud V., Liapidevskiy A. Real Time Digital Super-High Accuracy Vibrations Measurements: Methods, Devices and Mathematical Modeling for The Metrology. V sbornike: Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010. Ser. "Proceedings of the 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control, AsiaMIC 2010" Phuket, 2010. S. 343–347.
- [17] Zhmud' V.A., Voyevoda A.A., Goncharenko A.M. Mnogokanal'nyy pretsizionnyy bystrodeystvuyushchiy chastotomer. Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. № 1. S. 73–82.
- [18] Borisov B.D., Goncharenko A.M., Vasiliev V.A., Zhmud V.A. Precise Measurements of High-Stable Lasers Radiation Frequency and Phase. V sbornike: Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering Seventh International Symposium on Laser Metrology Applied to Science, Industry, and Everyday Life. Novosibirsk, 2002. P. 162–166.
- [19] Borisov B.D., Vasil'ev V.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Stability Estimation Technique of Frequency Standards. Avtometriya. 2002. № 3. P. 104–112.
- [20] Zhmud' V.A., Goncharenko A.M., Voyevoda A.A. Attestatsiya trekhkanal'nogo pretsizionnogo bystrodeystvuyushchego chastotomera. Nauchnyy vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2005. № 2. S. 175–179.
- [21] Goncharenko A.M., Vasil'yev V.A., Zhmud' V.A. Fazometr s geterodinnym preobrazovaniyem chastoty. patent na izobreteniyе RUS 2225012 19.04.2002
- [22] Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Pretsizionnyy vysokochastotnyy fazometr dlya izmereniy nanovibratsiy. Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. № 1 (55). S. 92–98.
- [23] Goncharenko A.M., Bugrov S.V., Voyevoda A.A., Zhmud' V.A. Metrologicheskiye ispytaniya tsifrovogo pretsizionnogo fazometra. Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2009. № 2 (56). S. 109–114.
- [24] Zhmud V.A., Prokhorenko E.V., Liapidevskiy A.V. The Problem Of Precision Fault-Tolerance Phase Measurements And Its Decision. V sbornike: Proceedings RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics" 2011. S. 34–38.
- [25] Goncharenko A.M., Bugrov S.V., Zhmud' V.A. Monitoring fazovykh prirashcheniy preryvistogo signala. Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Fizika. 2007. T. 2. № 1. S. 61–64.
- [26] Goncharenko A.M., Zhmud' V.A., Voyevoda A.A., Avilov S.A. Mikroprotsessornyy pretsizionnyy trekhkanal'nyy vysokoskorostnoy chastotomer bez "mertvogo vremeni". Pribory i tekhnika eksperimenta. 2007. № 2. S. 78–83.
- [27] Zhmud' V.A., Semibalamut V.M., Dimitrov L.V. Povysheniye tochnosti i nadezhnosti izmereniya raznosti faz. Avtomatika i programmaya inzheneriya. 2017. № 1 (19). S. 83–96.
- [28] Zhmud V.A., Goncharenko A.M. Modern Problems of High-Precision Measurements of the Phase Differences. V sbornike: 2016 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 - Proceedings 13. 2016. S. 314–318.
- [29] Zhmud' V.A., Voyevoda A.A., Semibalamut V.M., Goncharenko A.M., Bugrov S.V. Fazometr s geterodinnym preobrazovaniyem chastoty. patent na izobreteniyе RUS 2470312 28.09.2010.
- [30] Goncharenko A.M., Vasil'yev V.A., Zhmud' V.A. Tsifrovoy chastotomer. Patent na izobreteniyе RUS 2210785 13.07.2001
- [31] Zhmud' V.A., Goncharenko A.M. Sovremennyye problemy vysokotochnogo izmereniya raznostey faz. V sbornike: Aktual'nyye problemy elektronnoy priborostroyeniya trudy XII mezhdunarodnoy konferentsii: APEP-2014. 2014. S. 221-225.
- [32] Zhmud' V.A., Tereshkin D.O., Lyapidevskiy A.V., Zakharov A.V., Gololobov V.I. Povysheniye bystrodeystviya tsifrovogo pretsizionnogo fazometra. Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2011. № 4 (66). S. 23–34.
- [33] Zhmud' V.A., Goncharenko A.M. Pretsizionnyy chastotomer dlya fundamental'noy metrologii. Avtomatika i programmaya inzheneriya. 2014. № 2 (8). S. 74–81.
- [34] Zhmud V., Goncharenko A., Liapidevskiy A.V. Precision Frequency Meter for Basic Metrology and Displacement Measurements. V sbornike: Testing and Measurement: Techniques and Applications - Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015 2015. P. 125–130.



**Denis O. Tereshkin**, post-graduate student of Automatics Department of Novosibirsk State Technical University.

E-mail: [todin.dirhle@gmail.com](mailto:todin.dirhle@gmail.com)



**Vladimir M. Semibalamut** is the director of the Siberian branch of the Geophysical Service of the SB RAS, Candidate of Physical and Mathematical Sciences.

E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)

The paper was received on May 3, 2018.

# 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, программные платформы, мультиагентные системы, облачные технологии, инновации, информационные технологии, моделирование систем, свободное и открытое программное обеспечение.

Тематика журнала наиболее близка к следующим трем научным специальностям, согласно перечню ВАК:

**05.13.01 Системный анализ, управление и обработка информации.**

**05.11.16 Информационно-измерительные и управляющие системы (по отраслям).**

**05.13.05 Элементы и устройства вычислительной техники и систем управления.**

Также журнал заинтересован в опубликовании научных статей, по своей тематике тяготеющих к следующим научным специальностям.

05.02.05 Роботы, мехатроника и робототехнические системы.

05.11.07 Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы.

05.11.08 Радиоизмерительные приборы.

05.13.06 Автоматизация и управление технологическими процессами.

05.13.11 Математическое и программное обеспечение вычислительных машин, комплексов компьютерных сетей.

05.13.12 Системы автоматизации проектирования (по отраслям).

05.13.15 Вычислительные машины, комплексы и компьютерные сети.

05.13.18 Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

05.13.19 Методы и системы защиты информации, информационная.

Также журнал не исключает возможности публикации научных статей по тематике, близкой к следующим специальностям.

01.04.21 Лазерная физика.

01.01.09 Дискретная математика и математическая кибернетика.

01.04.01 Приборы и методы экспериментальной физики.

05.11.01 Приборы и методы измерения (по видам измерений).

05.09.07 Светотехника.

05.11.03 Приборы навигации.

01.04.03 Радиофизика.

05.11.15 Метрология и метрологическое обеспечение.

05.11.17 Приборы, системы и изделия медицинского назначения.

05.11.18 Приборы и методы преобразования изображений и звука.

05.12.04 Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения.

05.12.07 Антенны, СВЧ устройства и их технологии.

05.12.13 Системы, сети и устройства телекоммуникаций.

05.12.14 Радиолокация и радионавигация.

Статьи по тематикам вне этого перечня журнал может отклонить по признаку «не соответствие тематике журнала», вне зависимости от их качества, оригинальности и научного содержания.

## СВЯЗЬ С ПРИОРИТЕТНЫМИ НАПРАВЛЕНИЯМИ

Тематика журнала связана со следующими приоритетными направлениями развития науки РФ и критическими технологиями.

**Приоритетные направления** развития науки, технологий и техники в Российской Федерации:

«**Информационно-телекоммуникационные системы**».

Перечень **критических технологий** Российской Федерации: «Нано-, био-, **информационные, когнитивные технологии**», «**Технологии информационных, управляющих, навигационных систем**», «**Технологии создания высокоскоростных транспортных средств и интеллектуальных систем управления** новыми видами транспорта».

## 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 полностью, ни частично) 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 авторами иллюстраций и уравнений, если это требуется для понимания текста.

Иллюстрации из чужих источников запрещены к использованию в собственных статьях кроме случаев, когда без их цитирования невозможно понять оригинальные положения статьи; но и в этом случае они должны быть снабжены ссылками на эти источники. **Займствование иллюстраций без ссылок на источник приравнивается к плагиату.**

Статья должна содержать **новые научные результаты** и соответствовать тематике журнала. Иллюстрации – черно-белые или цветные (цветные – предпочтительно).

Формат страницы: А4, текст в две колонки, шрифт *Times New Roman*, размер основного текста 10 пт через один интервал. Заголовок (24 пт), сведения об авторах (11 пт), аннотация (9 пт) и ключевые слова (9 пт) – в одну колонку. Основной текст (10 пт) и литература (9 пт) – в две колонки. Если список литературы превышает 20 наименований, размер шрифта допускается 8 пт. Если рисунок, формула или таблица требуют использования полного пространства двух колонок, разрешается это делать в разрыве текста из двух колонок с последующим восстановлением двух колонок. Не следует нарушать внешние границы текста.

Информация об авторах дается в конце статьи, желательна фотография, электронная почта и адрес места работы с указанием страны, города, почтового отделения, улицы и номера дома. Перечень авторов дается на первой странице (только Фамилии, И.О. место работы, город, страна).

Статья обязательно должна содержать аннотацию (200–250 слов) и ключевые слова (8–10 слов или словосочетаний), литературные ссылки, необходимые для понимания статьи или для указания на источники цитирования. При этом ссылки на собственные публикации не должны преобладать: желательно, чтобы их количество не превышало 20% общего числа ссылок. Приветствуются ссылки на иностранные источники. Желательно, чтобы ссылок на такие источники было не менее 30%, что будет свидетельствовать о широком знакомстве авторов стать не только с отечественными достижениями в области по теме публикации, но и с международными достижениями в этой области.

Мы просим авторов не использовать автоматическую нумерацию рисунков, таблиц, разделов. Автоматическая нумерация списка литературных источников допускается. Также мы просим не использовать двойную и более сложную нумерацию таблиц и рисунков, а

также следить за соответствием этой нумерации ссылкам на нее в тексте. Не желательно использовать рисунки или таблицы без ссылки на них в тексте. Если рисунок или таблица единственные, они не нумеруются.

Также необходимо предоставлять перевод на английский язык всей информации, кроме основного текста (название, сведения об авторах, аннотация, ключевые слова, перечень литературы на кириллице).

## СТРУКТУРА СТАТЬИ

Объем аннотации не менее 200–250 слов продиктован тем, чтобы англоязычные читатели могли ознакомиться не только с темой статьи, но и с ее методами и результатами. Англоязычный вариант названия, аннотации и ключевых слов должен быть как можно более точным переводом русскоязычного варианта этой информации. Транслитерацию фамилий автора необходимо делать так, как это делалось в предшествующих публикациях этого автора и как это сделано в международном паспорте (при наличии).

Настоятельно рекомендуется структурирование статьи по IMRAD, т.е. статья должна содержать: Введение, Методы, Результаты, Обсуждение. Названия второго и третьего разделов при более детальной структуре могут отличаться, но по сути должны содержать указанные сведения. Раздел «Обсуждение» может быть назван «Заключение», однако, лучше, если статья будет содержать по отдельности *Обсуждение*, *Заключение* и *Благодарности* (при необходимости).

Также смотрите рекомендации по структурированию статьи на сайте <http://sokogskriv.no/en/writing/structure/the-imrad-format/>.

Используйте раздел **Введение**, чтобы показать, что вы хорошо осведомлены о своей области исследований и существующих исследованиях. Ваше введение должно содержать:

- резюме существующих исследований по этому вопросу;
- ваше заявление о тезисе, гипотезе или вопросе исследования;
- теорию (если уместно);
- введение в область знаний, текущая ситуация или сложившаяся практика.

Введение должно объяснить, что авторы знают, и о чем они не уверены. Оно должно объяснять и обобщать, но оно также должно задавать вопросы, разъяснять, сравнивать и т. д. Все, что авторы пишут здесь, должно быть связано с темой их исследования.

Используйте раздел **Метод**, чтобы показать, что вы пришли к своим результатам, применяя действующие и надежные методы. Объясните, что вы сделали; какова методика ваших исследований (если она нова, в чем ее новизна),

как вы использовали ваши дополнительные профессиональные знания, полученные в результате ранее выполненных вами исследований или ваши новые гипотезы, как вы это сделали. Укажите, что вы дополнительно учли, в отличие ранее опубликованных статей, что дополнительно применили, и т. д., возможно, чем вы пренебрегли, и почему это допустимо, и что это позволило сделать.

В разделе **Способ** следует показать, как вы пришли к своим результатам.

В разделе **Результаты** приводятся собственно результаты. Наибольшая часть вашей статьи должна быть посвящена вашим результатам, выводам, полученным данным. В этом разделе необходимо представить результаты так, чтобы это было понятно читателю.

В **Заключении** уместно дать рекомендации (которые будут применяться на практике), указать направления дальнейших исследований. Опишите кратко, какой ответ на какой вопрос вы нашли в результате своего исследования. Если у вас есть гипотеза, была ли она была подтверждена, опровержена или уточнена. Не вводите здесь проблемы, о которых ранее не упоминалось. Если результаты вашего исследования не дают научных оснований, чтобы сделать какие-либо выводы, не следует завершать статью такими выводами. Даже один необоснованный вывод ставит под сомнение всю статью. Выводы должны в точности следовать из содержания статьи, не быть необоснованно расширенными или излишне обуженными.

#### РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

**Присланные статьи подвергаются анонимному рецензированию.** Редакционная коллегия вправе отклонить статью от опубликования с указанием причин этого отклонения или предложить доработать статью по замечаниям рецензента.

Если, по мнению редакционной коллегии, к тексту статьи требуются примечания, редакционная коллегия вправе включать таковые, извещая предварительно об этом авторов. Авторы могут по своему усмотрению внести исправления в текст (устраняющие необходимость примечания), либо согласиться с примечанием.

#### ОТВЕТСТВЕННОСТЬ АВТОРОВ

Ответственность за научное содержание статей и за качество перевода на английский язык лежит на авторе (авторах) публикации. Факт направления статьи в редакционную коллегия трактуется редакционной коллегией как заключение устного договора на передачу исключительных прав опубликования данного материала редакционной коллегии, в случае, если статья не будет отклонена.

Исключительность прав понимается в том смысле, что авторы декларируют, что данная статья не была направлена, не направлена и не будет направлена ни в какие иные СМИ на языке представленного оригинала. Указанные права не препятствуют опубликованию данной статьи теми же авторами на другом языке, кроме русского и английского. При этом редакционная коллегия обязуется обеспечить научное рецензирование, редактирование и опубликование с открытым доступом.

Авторский коллектив обязуется обеспечить отсутствие плагиата, включая автоплагиат, и выполнение других требований, опубликованных в этом разделе. **Статья, отклоненная вследствие выявления наличия плагиата вне зависимости от объема такового, отклоняется окончательно и не принимается даже после доработки.** В случае повторной попытки опубликования плагиата тем же автором журнал прекращает какое-либо взаимодействие с этим автором и в дальнейшем никакие статьи от этого автора не принимает.

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. Если бумажный вариант не получен, ответственность за его наличие и за совпадение электронного варианта с бумажным вариантом лежит на авторском коллективе.

Все вопросы по опубликованию можно уточнить по электронной почте.

#### 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 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 для первого рецензирования на одном языке (русском или английском) с последующим обязательным предоставлением окончательной версии статьи на двух языках. Подписи на иллюстрациях также должны делаться на двух языках, или только на английском (в этом случае в русскоязычном варианте статьи в подписанных 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 публикуются только краткие сведения (аннотация, ключевые слова, сведения об авторах и библиографические ссылки).

Желательно указание индекса УДК и (или) МКИ.

Допускается прием к опубликованию статей только на английском языке для англоязычных авторов. В этом случае англоязычная версия публикуется в русскоязычной и англоязычной версии журнала.

### 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. При этом полное или сокращенное слово «Рисунок», «Таблица» и т. д. пишется с заглавной буквы. Между точкой после сокращения и цифрой, означающей нумерацию рисунка или таблицы, пожалуйста, используйте символ «неразрывный пробел», который вставляется в текст при одновременном нажатии клавиш *Shift*, *Ctrl* и «пробел». Например, «на *Рис. 2* показано».

Для чисел использовать курсив не следует.

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*».

При написании формул используйте соответствующее программное обеспечение *Math (Microsoft Equation)*, встраиваемое в *Word*. Знаки препинания после уравнений, пожалуйста, пишите не в составе формул, а после формул как элементы текста.

В формулах использование курсива и прямого шрифта также имеет больше смысловое значение, а именно: для цифр и русских букв, скобок, других служебных символов курсив не применяется. Курсив следует использовать для латинских букв, за исключением тех случаев, когда латинские буквы применяются для обозначения стандартных функций: *exp*, *sin*, *cos*, *log*, *lg*, *ln*, *mod*, *max*, *min* и так далее – пишутся без курсива.

Мы просим авторов не использовать без необходимости *Math (Microsoft Equation)* для написания простейших формул в тексте абзаца, например, указание на значение какой-то из величин, или приведение простого соотношения, которое укладывается в половину строки и на которое не делается ссылок в дальнейшем.

Статьи, оформленные с существенными нарушениями требований к оформлению, могут быть отклонены от опубликования на этом основании.

### ОФОРМЛЕНИЕ ЛИТЕРАТУРЫ

Мы просим наших авторов при оформлении списка цитируемых публикаций давать два варианта: для русскоязычных читателей (Литература) и для англоязычных читателей (*References*). Во втором случае публикации на иностранных языках записываются так же, как они пишутся в оригинале. Публикации на русском языке следует перевести на английский язык, либо осуществить транслитерацию с помощью сайта <https://translate.google.ru> или <http://translit.net/>. Если вы ссылаетесь на публикацию нашего журнала, пожалуйста, используйте англоязычное название в списке для англоязычных читателей, а именно: *Automatics & Software Enginery*. Аналогично если журнал выходит на двух языках, русском и английском, мы убедительно просим авторов в русскоязычной версии ссылок давать ссылку на русский вариант издания, а в англоязычной версии – ссылку на английский вариант издания. Если при этом страницы соответствующих статей не совпадают, пожалуйста, используйте правильные страницы публикаций. Если вы знакомы со статьей только по англоязычному варианту, либо если статья написана только на английском или другом иностранном языке, в этом случае ссылка на нее в каждом из перечней дается на языке оригинала.

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА ПО ВЕРСИИ IEEE

Предпочтительные ключевые слова предлагается брать из версии IEEE, например, из приведенного ниже списка.

#### Circuits and systems

Circuits  
Active circuits  
Active inductors  
Operational amplifiers  
Analog circuits  
Analog integrated circuits  
Analog processing circuits  
Digital signal processors  
Electronic circuits  
Feedback  
Negative feedback  
Microprocessors  
Automatic logic units

Coprocessors  
Microcontrollers  
**Communications technology**  
Communication equipment  
Optical communication equipment  
Communication system control  
Telecommunication control  
Communication system security  
Computer networks  
Computer network management  
**Computers and information processing**  
Approximate computing  
Computer applications  
Software debugging  
Software design  
**Control systems**  
Automatic control  
Power generation control  
Automatic generation control  
Centralized control  
Closed loop systems  
Control design  
Control engineering  
Control equipment  
Actuators  
Electrostatic actuators  
Intelligent actuators  
Microactuators  
Piezoelectric actuators  
Microcontrollers  
Regulators  
Servosystems  
Servomotors  
Switches  
Microswitches  
Optical switches  
Telecontrol equipment  
Control system synthesis  
Controllability  
Decentralized control  
Distributed parameter systems  
Delay systems  
Added delay  
Delay lines  
Digital control  
Programmable control  
Fault tolerant control  
Feedback  
Feedback circuits  
Output feedback  
Negative feedback  
Neurofeedback  
Linear feedback control systems  
Frequency locked loops  
Phase locked loops  
State feedback  
Tracking loops  
Mechanical variables control  
Displacement control  
Force control  
Level control  
Gyroscopes  
Motion control  
Position control  
Nanopositioning  
Velocity control  
Angular velocity control  
Vibration control  
Medical control systems  
Networked control systems  
Nonlinear control systems  
Open loop systems  
Optical control  
Lighting control  
Optical variables control  
Optimal control  
PD control  
Pi control  
Proportional control  
Robot control  
Robot motion  
SCADA systems  
Sensorless control  
Sliding mode control  
Supervisory control  
Thermal variables control  
Temperature control  
Cooling  
Heating  
Traffic control  
Vehicle routing

# Content

<b>I. Automation. Automated Systems</b>	<b>8</b>
Robust Systems Synthesis with PI2D-controller for Nonlinear Objects with Variable Parameters G.A.Frantsuzova	9
Effective Simplification of a Precision Frequency Synthesizer V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, A. Yu. Ivoilov	17
Smooth Control of a Precision Frequency Synthesizer V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, A. Yu. Ivoilov	25
<b>II. Robotics. Software and Systems. Telemechanics and Telemetry</b>	<b>32</b>
Obtaining the Desired form of the Processes of the Stabilizing System of the Two-Wheeled Balancing Robot Based on the Numerical Optimization A.Yu. Ivoylov, V.A. Zhmud, V.G. Trubin, H. Roth	33
Automation of Selection of Formants and Search for Aligned Fragments of Phonograms in Preparation for Phonoscopic Examination I.A. Gurakov, E.Yu. Kostyuchenko, D.I. Novohrestova	45
<b>III. Innovative Technologies. Promising Technologies. Simulation of Systems. Numerical optimization</b>	<b>51</b>
Methods of Designing and Modeling of Human-Machine Systems Based on Functional-Structural Theory M. G. Grif, S. A. Kochetov, N. D. Ganelina	52
<b>IV. Measuring Means and Systems. Identification. Telemechanics and Telemetry</b>	<b>59</b>
Seismic Imaging Technology E. V. Rabinovich, G. S. Shefel, A. V. Zhukov	60
The Algorithm for Identifying the Impulse Response Function at a High Noise Level of Measuring the Input Signal of the System Yu.E. Voskoboinikov, D. A. Krysov	67
<b>V. Information Technologies</b>	<b>76</b>
Development of Software for Monitoring the Activity of Users of Personal Computers to Optimize the Business Processes of an Enterprise E. A. Basinya, S. V. Kazarbin	77
Development of cross-network relay E.A. Basinya, A.A. Yushmanov	83
<b>VI. Tools of Theory of Locked Dynamic Systems for Physical and Technical Sciences. Information for Authors</b>	<b>90</b>
Relativity in the Light of the Theory of Locked Dynamical Systems and Criticism of its Criticism V.A. Zhmud	91
Modern Methods of Measuring Frequency and Phase in Real Time D.O. Tereshkin, V.M. Semibalamut	117
Requirements for Publication in Scientific Electronic Journal "Automation and Software Engineering"	131
Content	136

**Chief Editor – Professor Vadim A. Zhmud**, Head of Department of Automation in Novosibirsk State Technical University (NSTU), the Vice-Director of Novosibirsk Institute of Program Systems (NIPS). **Novosibirsk, Russia** E-mail: [oaо\\_nips@bk.ru](mailto:oaо_nips@bk.ru)

**Editorial Council:**

- Vadim A. Zhmud** Chief Editor, Head of Department of Automation in Novosibirsk State Technical University (NSTU), the Vice-Director of Novosibirsk Institute of Program Systems (NIPS). **Novosibirsk, Russia**
- Galina A. Frantsuzova** Deputy Editor-in-Chief, Deputy Chairman of the Editorial Board, Professor of the Automation Department of the Novosibirsk State Technical University (NSTU), **Novosibirsk, Russia**
- Alexander V. Liapidevskiy** Director of Novosibirsk Institute of Program Systems (NIPS), Ph.D., **Novosibirsk, Russia**
- Uranchimeg Tudevtagva** Professor of Mongolian State University of Science and Technology Honorable Doctor of NSTU. Ulaan Baator, **Mongolia**
- Lubomir V. Dimitrov** Vice-Rector of Technical University of Sofia, Doctor, Honorable Doctor of NSTU, Professor, Sofia, **Bulgaria**
- Aleksey V. Taichenachev** Director of Institute of Laser Physics SB RAS, Doctor of Phys. and Mathemat. Sci., Professor, Corresponding Member of Russian Academy of Sciences, Member of the Presidium of the Higher Attestation Commission, **Novosibirsk, Russia**
- Eric Halbach** D.Sc. (Tech.), Tampere University of Technology, Laboratory of Automation and Hydraulics, P.O. Box 589, 33101 **Tampere, Finland**

**Editing Board:**

- Anatoly S. Vostrikov** Professor, Department of Automation in NSTU, Doctor of Technical Science, Distinguished Lecturer of Russia, Academician of Academician of the International Academy of Higher Education, Novosibirsk and Moscow, **Russia**
- Nikolay D. Polyakhov** Professor, Doctor of Technical Sciences, Saint-Petersburg Electrotechnical University (ETU LETI), member of Editing Board of Journal “Electricity” (Elektrichestvo – in Russian), member of expert consil of Higher Attestation Consil RF. Saint-Petersburg, **Russia**.
- Eugeny B. Tsoy** Vice-Rector on International collaborations NSTU, Professor, Doctor of Sciences. **Novosibirsk, Russia**
- Vladimir I. Guzhov** Professor, Doctor of Technical Sciences, Department of Data Acquisition Systems in Novosibirsk State Technical University, **Novosibirsk, Russia**
- Shiva S. Mahapatra** Professor in the Department of Mechanical Engineering, NIT Rourkela, **India**

- Hubert Roth** Head of the Department of Automatic Control Engineering of University of Siegen, Professor, **Germany**
- You Bo** Director of Institute of Robotics and Automation Technology, Dean of School of Automation, Professor, Harbin University of Science and Technology, **China**
- Jaroslav Nosek** Professor in Technical University of Liberec, Director of Institute for Nanomaterials, Advanced Technologies and Innovation, Honorable Doctor of NSTU. Liberec, **Czech Republic**
- Petr Tůma** Professor at the Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Education Technical University of Lyuberets, Doctor, **Czech Republic**
- Thierry Chateau** Full Professor, Université Blaise Pascal, Head of ISPR/ComSee Team, Clermont Ferrand, **France**.
- Wolfram Hardt** Vice-Dean on International Affairs, Director of University Computer Center, Professor on Technical Informatics, Technical University of Chemnitz, **Germany**
- Vimal J. Savsani** Associate Professor at B. H. Gardi college of engineering and technology, Surat, **India**
- Ravipudi Venkata Rao** B. Tech., M. Tech., Ph.D., D.Sc. (**Poland**). Professor, Department of Mechanical Engineering, Former Dean (Academics) and Head (Mech. Engg. Dept.) Sardar Vallabhbhai National Institute of Technology (SV NIT) {An Institute of National Importance of Government of India} Ichchanath, Surat-395 007, Gujarat State, **India**.
- Nematzhon R. Rakhimov** Head of the Laboratory of Optoelectronic Sibirean State Geophysics Academy, Professor, Doctor of Technical Science, **Russia and Uzbekistan**
- Gennady P. Tsapko** Professor of the Department of Automation and Computer Systems of the National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Director of Research and Education Center of CALS-technologies, Professor, Doctor of Technical Sciences, Academician of the International Academy of Informatization, Tomsk, **Russia**
- Alexander M. Malishenko** Professor of the Automation and Robotics Department of the Engineering School of Information Technologies and Robotics of TPU, Doctor of Technical Sciences, Academician of the Institute of Higher School of Economics and the Academy of Electrotechnical Sciences of the Russian Federation, Tomsk, **Russia**
- Vadim Ya. Kopp** Head of the Department of Automated Instrument Systems in Sevastopol National Technical University, Honored Worker of Science and Technology, Professor, Sevastopol, **Russia** and **Ukraine**

- Alexander A. Voevoda** Professor, Department of Automation in NSTU, Doctor of Technical Science, Academician of International Academy of Sciences of Higher Education, Novosibirsk, **Russia**
- Eugeny V. Rabinovich** Professor, Department of Computer Science, NSTU, Doctor of Technical Science, Professor, Novosibirsk, **Russia**
- Michail G. Grif** Head of the Department of Automated Control Systems, NSTU, Doctor of Technical Science Professor, Novosibirsk, **Russia**
- Boris B. Borisov** Head of the Laboratory of the Institute of Laser Physics SB RAS (ILP SB RAS), Doctor of Technical Science, Novosibirsk, **Russia**
- Sergey L. Minkov** Head of the department of information support innovation Researching National University “Tomsk State University”, PhD, Physical and Mathematical Sciences, major researcher, Corresponding Member of International Academy of Informatization, Tomsk, **Russia**
- Boris V. Poller** Head of the Laboratory of the Institute of Laser Physics SB RAS (ILP SB RAS), Doctor of Technical Science, Novosibirsk, **Russia**
- Tatiana V. Avdeenko** Head of the Department of Economic Informatics NSTU, Professor, Doctor of Technical Science, Novosibirsk, **Russia**
- Bayardin Bat-Erdene** Deputy Director of Research and Innovation Energy Institute in Mongolian State University of Science and Technology, Ph.D. ass. Professor. Ulaan Baator, **Mongolia**
- Anatoly M. Korikov** Head of the Department of Control Systems and Radio Electronics in Tomsk University of Systems of Control and Radioelectronics (TUSUR). Professor, Doctor of Technical Science, Academician of International Academy of Sciences of Higher Education, expert in system analysis and automatics. Tomsk, **Russia**
- Vitaly S. Shcherbakov** Dean of the Faculty, “Oil and gas and construction equipment”, Head of Department “Automation of production processes and Electrical Engineering”, Doctor of Technical Sciences, Professor, Siberian State Automobile and Road Academy (SibADI), Omsk, **Russia**
- Aleksey A. Ruppel** PhD, Technical Science, Associate Professor, Siberian State Automobile and Road Academy (SibADI), Omsk, **Russia**
- Senge S. Yampilov** Professor of Department “Biomedical Engineering: Processes and Equipment for Food Production”, Doctor of Technical Sciences, Ulan-Ude, **Russia**
- Vladimir I. Gololobov** Head of Laboratory in NIPS, PhD, Novosibirsk, **Russia**
- Konstantin V. Zmeu** Associate Professor, PhD., Head of the Department of Technology of Industrial Production, the Engineering School of the Far Eastern Federal University, Vladivostok, **Russia**

- Oleg V. Stukach** Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department in National Research Tomsk Polytechnic University (TPU), Tomsk, **Russia**
- Aleksey D. Pripadchev** Professor, Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Flying Apparatus of Orenburg State University, Aero-Space Institute, Orenburg, **Russia**
- Victor P. Melchinov** PhD., Assistant Professor, Head of the Department of Radiotechniques and Information Technologies of North-West Federal University honored to M.K. Ammosov, Yakutsk, **Russia**
- Vyacheslav N. Fyodorov** PhD., Assistant Professor, Department of Radiotechniques and Information Technologies of North-West Federal University honored to M.K. Ammosov, Yakutsk, **Russia**
- Ulyana A. Mikhalyova** PhD., Assistant Professor, Head of the Department “Multi-Channel Telecommunication Susters” of Technology Institute of North-West Federal University honored to M.K. Ammosov, Yakutsk, **Russia**
- Anastasiya Stotskaya** PhD., Assistant Professor, Deputy Head of Automatic control system department, Saint-Petersburg Electrotechnical University (ETU LETI), Saint-Petersburg, **Russia**
- Anastasiya Rusina** Professor of the Department of Automated Electical and Power Systems of NSRU, Doctor of Technical Sciences, Novosibirsk, **Russia**
- Michail V. Kalinin** Content manager, NIPS, Novosibirsk, **Russia**



ISSN 2312-4997 for paper version  
ISSN 2618-7558 for electronic pdf-version