

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

# АВТОМАТИКА И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

2019 N 1(27)

**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), член IEEE, **Новосибирск, Россия**

#### **Редакционный совет:**

- Вадим Аркадьевич Жмудь**      Главный редактор, Председатель редакционного совета, член IEEE, 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 Блез 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.**
- Неъматжон 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 Отделения автоматизации и робототехники инженерной школы информационных технологий и робототехники 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**

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

- Олег Владимирович Стукач** доктор технических наук, профессор Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» и Новосибирского государственного технического университета, член IEEE, **Москва – Новосибирск – Томск, Россия**
- Алексей Дмитриевич Припадчев** Д.т.н., профессор, Заведующий кафедрой летательных аппаратов ФГБОУ ВПО «Оренбургский государственный университет», Аэрокосмический институт, **Оренбург, Россия**
- Виктор Петрович Мельчинов** К.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, **Якутск, Россия**
- Вячеслав Николаевич Федоров** К.т.н., доцент кафедры радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, **Якутск, Россия**
- Ульяна Анатольевна Михалёва** К.т.н., заведующий кафедрой «Многоканальные телекоммуникационные системы» Технологического института ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова, **Якутск, Россия**
- Анастасия Дмитриевна Стоцкая** К.т.н., доцент, зам. зав. кафедрой Систем автоматического управления, Санкт-Петербургский Электротехнический университет (ЭТУ ЛЭТИ), **Санкт-Петербург, Россия**
- Анастасия Георгиевна Русина** профессор кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем Новосибирского государственного технического университета, доктор технических наук, доцент, **Новосибирск, Россия**
- Ольга Николаевна Долиннина** Директор института прикладных информационных технологий (ИнПИТ) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., доктор технических наук, доцент, **Саратов, Россия**
- Михаил Витальевич Калинин** Контент-менеджер ПАО «НИПС», **Новосибирск, Россия**

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, 6/1,

ПАО «НИПС», заместителю директора по науке

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

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

Подписано в печать 28 марта 2019 г.

## Оглавление

<b>I. Автоматика. Автоматизированные системы.....</b>	<b>8</b>
Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса .....	9
Воробьев В.Ю., Саблина Г.В. ....	9
Разработка пневмоэлектрической системы управления машиной вакуумного пылеудаления .....	15
Д.А. Степанов, Г.В. Саблина .....	15
<b>II. Робототехника. Электроника. Программные средства и системы.</b>	<b>21</b>
Рекомендации по выбору и подключению реле для коммутации бытовых нагрузок .....	22
А.И. Незванов, В.Г. Трубин, М.В. Трубин .....	22
<b>III. Инновационные технологии. Перспективные технологии.</b>	<b>33</b>
<b>    Моделирование систем. Численная оптимизация.....</b>	<b>33</b>
Преимущества и проблемы разработки беспилотных одноколесных балансирующих роботов.....	34
В.А. Жмудь <sup>1</sup> , А.Ю. Ивойлов <sup>1</sup> , И.Л. Рева <sup>1</sup> , Л.Д. Димитров <sup>2</sup> , В.Г. Трубин <sup>1</sup> , Я. Носек <sup>3</sup> , Г. Рот <sup>4</sup> .....	34
<b>IV. Измерительные средства и системы. Идентификация.</b>	<b>47</b>
<b>    Телемеханика и телеметрия.....</b>	<b>47</b>
Оптимизация мультипликативных алгоритмов вейвлет-фильтрации изображений.....	48
Ю.Е. Воскобойников <sup>1,2</sup> .....	48
Мобильная компьютерная система для диагностики состояния органов желудочно-кишечного тракта на основе Bluetooth технологий .....	54
Х.Н. Зайнидинов <sup>1</sup> , Ф.Ф. Ражабов <sup>1</sup> , Г.М. Ходжиматов <sup>2</sup> .....	54
Результаты деформографических измерений в штольне на обсерватории Талая.....	65
Ю.Н. Фомин <sup>1</sup> , В.М. Семибаламут <sup>1</sup> , В.А. Жмудь <sup>2,3</sup> , С.В. Панов <sup>3</sup> , М.Д. Парушкин <sup>3</sup> , Л.В. Димитров <sup>4</sup> ...	65
Результаты наблюдений долговременных колебаний земной коры в Байкальской рифтовой зоне.....	77
Ю.Н. Фомин <sup>1</sup> , В.А. Жмудь <sup>2,3</sup> , В.М. Семибаламут <sup>1</sup> , С.В. Панов <sup>3</sup> , М.Д. Парушкин <sup>3</sup> , Л.В. Димитров <sup>4</sup> ...	77
Применение метода эмпирической модовой декомпозиции для обработки результатов деформографических измерений.....	87
Ю.Н. Фомин <sup>1</sup> , В.А. Жмудь <sup>2,3</sup> , В.М. Семибаламут <sup>1</sup> , Д.О. Терешкин <sup>1</sup> , С.В. Панов <sup>3</sup> , Л.В. Димитров <sup>4</sup> ....	87
Анализ сигнала измерителя деформаций земной коры в Байкальской рифтовой зоне	101
Ю.Н. Фомин <sup>1</sup> , В.А. Жмудь <sup>2,3</sup> , В.М. Семибаламут <sup>1</sup> , Д.О. Терешкин <sup>1</sup> , С.В. Панов <sup>3</sup> , Л.В. Димитров <sup>4</sup> ..	101
<b>V. Информационные технологии.....</b>	<b>109</b>
Распространение информационных и шумовых импульсных сигналов в оптическом волокне при защите информации .....	110
Кулдашов О.Х., Мамарозиков Ф.Д., Муминов Ж. ....	110
<b>VI. Инструментарий теории замкнутых динамических систем для физических и технических наук. Дискуссии. К сведению авторов.</b>	<b>118</b>
Концепция умного дома: безопасность, дополнительные возможности и дополненная реальность.....	119
А.В. Ляпидевский <sup>1</sup> , В.А. Жмудь <sup>1,2</sup> , О.Н. Долинина <sup>3</sup> , Л.В. Димитров <sup>4</sup> .....	119
Требования к публикациям в научном электронном журнале «АиПИ».....	129
Content .....	134

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

## **Содержание раздела:**

- ◇ Воробьев В.Ю., Саблина Г.В. Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса. ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 1 (27). С. 9–14.
- ◇ Д.А. Степанов, Г.В. Саблина. Разработка пневмоэлектрической системы управления машиной вакуумного пылеудаления. ФГБОУ ВО НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2018. № 1 (27). С. 15–20.

# Расчёт и оптимизация параметров дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса

Воробьев В.Ю., Саблина Г.В.

ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация.** Данная статья посвящена получению дискретных моделей непрерывных ПИД-регуляторов, а также изучению одного из методов автоматического расчета и настройки параметров регулятора – методу Циглера–Николса. Будет осуществлен расчет параметров дискретного ПИД-регулятора данным методом, а также смоделированы и оптимизированы системы с дискретными ПИД-регуляторами для объекта 3-го порядка. Моделирование будет осуществляться при помощи программной среды *Matlab* и библиотеки *Simulink*.

**Ключевые слова:** ПИД-регулятор, метод Циглера-Николса, оптимизация, *Matlab Simulink*, качество переходного процесса, робастность.

## ВВЕДЕНИЕ

ПИД-регулятор (пропорционально-интегрально-дифференциальный) относится к наиболее распространенному типу регуляторов [1, 2]. Изобретенный еще в 1910 году, он получил своё развитие в 1980-х годах после появления микропроцессоров [3]. На текущий момент времени вероятно, около 90–95% регуляторов, находящихся в эксплуатации, используют ПИД-алгоритм. Причинами столь высокой популярности является простота построения и промышленного использования, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость. Помимо этого, было предложено множество методов для автоматического расчета и настройки параметров регулятора, таких как: метод Циглера-Николса, метод Чина-Хронеса-Ресвика и другие [4]. Большинство из этих методов применимы как к непрерывным, так и дискретным системам.

Непрерывная реализация ПИД-регулятора описывается уравнением:

$$u(t) = K \left( e(t) + 1/T_I \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right)$$

где  $e(t)$  – ошибка воспроизведения входного воздействия;  $K$ ,  $T_I$ ,  $T_D$  – параметры ПИД-регулятора.

Дискретных реализаций непрерывного ПИД-регулятора достаточно много [5]. Так, например, если выбрать процедуру интегрирования по методу прямоугольников и первую разность для реализации процедуры дифференцирования, можно получить приближённую дискретную реализацию ПИД-регулятора:

$$u(kT) = K \left( e(kT) + \frac{1}{T_I} \sum_{i=0}^{k-1} e(iT)T + T_D \frac{e(kT) - e(kT-T)}{T} \right),$$

где  $k$  – дискретный момент времени,  $T$  – шаг дискретизации.

Рекуррентную процедуру вычисления управления [6] получим из последнего равенства:

$$u(k) = u(k-1) + q_0 e(k) + q_1 e(k-1) + q_2 e(k-2),$$

где

$$q_0 = \left( K + K \frac{T_D}{T} \right), q_1 = \left( -K + K \frac{T}{T_I} - 2K \frac{T_D}{T} \right), q_2 = K \frac{T_D}{T}.$$

Первая методика расчёта параметров регулятора была предложена учёными Циглером и Николсом в 1942 году [6]. Данная методика очень проста, но, к сожалению, не даёт наилучших результатов. Тем не менее, она до сих пор очень часто используется на практике.

Метод Циглера-Николса относится к эмпирическим методам и основан на использовании данных, полученных экспериментально в результате эксплуатации этого объекта. Заметим, что данный метод применим только для устойчивого объекта управления.

После расчёта параметров регулятора данным методом требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования.

Впервые данный метод был применён для расчёта параметров регулятора для объекта, реакция которого на единичное ступенчатое воздействие показана на *Рис. 1*.

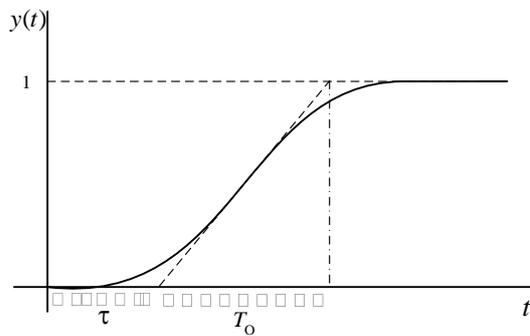


Рис. 1. Примерная переходная характеристика объекта управления

Такую характеристику обычно называют кривой разгона. Объект управления, имеющий такую переходную характеристику, представляется в виде последовательного соединения, апериодического и запаздывающего звеньев. Его передаточная функция имеет следующий вид:

$$W(p) = \frac{K_o}{T_o p + 1} e^{-p\tau},$$

где  $K_o$  – коэффициент передачи,  $T_o$  – постоянная времени, характеризующая инерционные свойства объекта,  $\tau$  – время запаздывания.

В Таблице 1 приведены расчётные соотношения для вычисления параметров дискретного ПИД-регулятора для данного объекта методом Циглера-Николса.

Таблица 1

	$K$	$T/T_{II}$	$T_D/T$
П	$\frac{T_o}{\tau+T}$	-	-
ПИ	$\frac{0.9T_o}{(\tau+T/2)} - \frac{0.135 \cdot T_o \cdot T}{(\tau+T/2)^2}$	$\frac{0.27 \cdot T_o \cdot T}{K_o(\tau+T/2)^2}$	-
ПИД	$\frac{1.2 \cdot T_o}{\tau+T} - \frac{0.3 \cdot T_o \cdot T}{(\tau+T/2)^2}$	$\frac{0.6 \cdot T_o \cdot T}{K_o(\tau+T/2)^2}$	$\frac{0.5 \cdot T_o}{K_o \cdot T}$

### 1. РАСЧЕТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ С ОБЪЕКТОМ 3-ГО ПОРЯДКА

Для исследования выберем объект 3-го порядка, передаточная функция которого имеет вид:

$$W(p) = \frac{1}{0.5p^3 + 2.5p^2 + 1.8p + 1}.$$

По переходной характеристике объекта (Рис. 2) определим время запаздывания  $\tau = 0,7$  с и постоянную времени  $T_o = 4,1$  с. По Таблице 1 рассчитаем параметры  $K$ ,  $T_D/T$ ,  $T/T_{II}$ . Шаг дискретизации примем равным  $T = 0,1$  с. Получим:

$$K = \frac{1,2T_o}{\tau+T} - \frac{0,3T_o T}{(\tau+T/2)^2} = 5,9313,$$

$$T_D/T = \frac{0,5T_o}{K_o T} = 20,5,$$

$$T/T_{II} = \frac{0,6T_o T}{K_o(\tau+T/2)^2} = 0,4373.$$

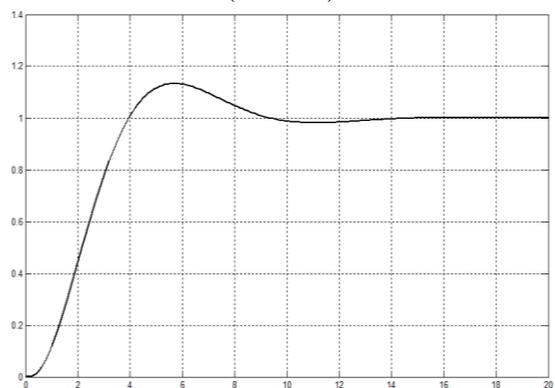


Рис. 2. Переходная характеристика объекта

По рассчитанным параметрам  $K$ ,  $T_D/T$ ,  $T/T_{II}$  определим коэффициенты  $q_i$ :

$$q_0 = K + K \frac{T_D}{T} = 127,523,$$

$$q_1 = -K + K \frac{T}{T_{II}} - 2K \frac{T_D}{T} = -246,5208,$$

$$q_2 = K \frac{T_D}{T} = 121,5917.$$

Теперь смоделируем систему с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным методом Циглера-Николса и непрерывным объектом 3-го порядка. Схема моделирования приведена на Рис. 3, а полученный переходный процесс на Рис.4.

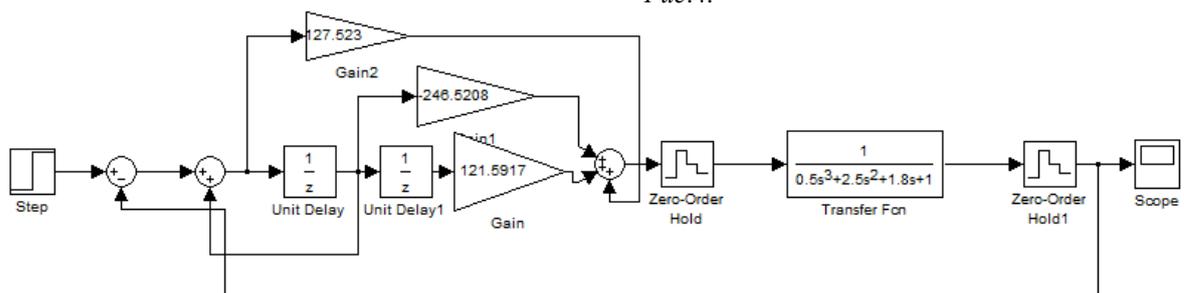


Рис. 3. Схема моделирования системы с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным методом Циглера-Николса, и объектом 3-го порядка

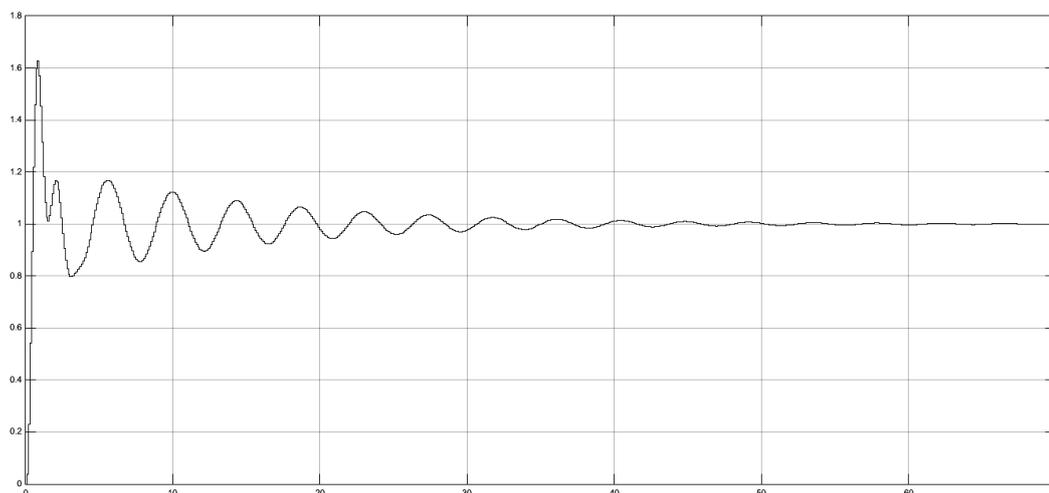


Рис. 4. Переходный процесс системы с регулятором

## 2. ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМЫ

Далее произведём оптимизацию системы с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным методом Циглера-Николса.

Требования, предъявляемые к системе:

1. Устойчивость;
2. Требуемые критерии качества:
  - перерегулирование  $\sigma \leq 40\%$ ;
  - длительность переходного процесса  $t_{\Pi} \leq 5$  с;
  - статическая ошибка  $\Delta \leq 5\%$ .
3. Робастность.

Наилучший результат получился при следующих значениях коэффициентов:

$$K = 7, T/T_{II} = 0.082, T_D/T = 10.$$

Коэффициенты  $q_i$ , рассчитанные по этим параметрам, имеют следующие значения:

$$q_0 = K + K \frac{T_D}{T} = 77,$$

$$q_1 = -K + K \frac{T}{T_{II}} - 2K \frac{T_D}{T} = -146,426,$$

$$q_2 = K \frac{T_D}{T} = 70.$$

Схема моделирования системы и полученный переходный процесс представлены на Рис. 5 и 6.

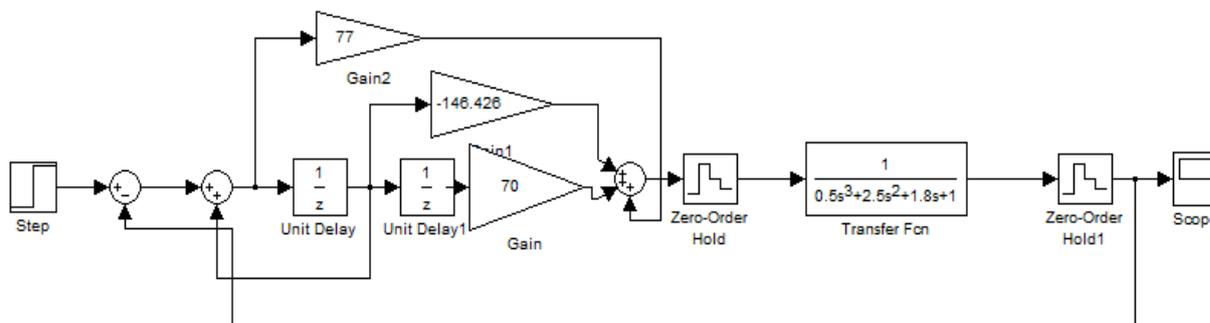


Рис. 5. Структурная схема оптимизированной системы с непрерывным объектом

По переходному процессу определим перерегулирование:  $\sigma = 40\%$  и длительность переходного процесса:  $t_{\Pi} = 3$  с. Видим, что при помощи оптимизации нам удалось значительно улучшить качество регулирования.

Проверим оптимизированную систему на робастность. Для этого изменим (уменьшим) каждый из коэффициентов  $q_i$  на 1%.

Коэффициенты  $q_i$  будут иметь следующие значения:

$$q_0 = 76,23, q_1 = -144,962, q_2 = 69,3.$$

Переходный процесс в системе с коэффициентами, изменёнными на 1% представлен на Рис. 7.

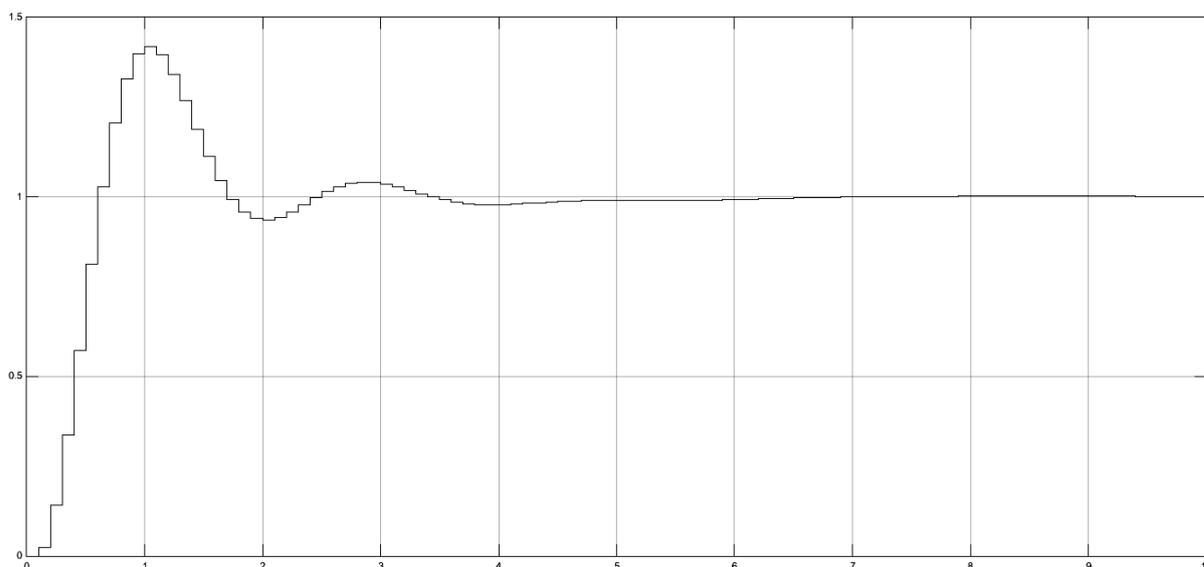


Рис. 6. Переходный процесс оптимизированной системы с непрерывным объектом

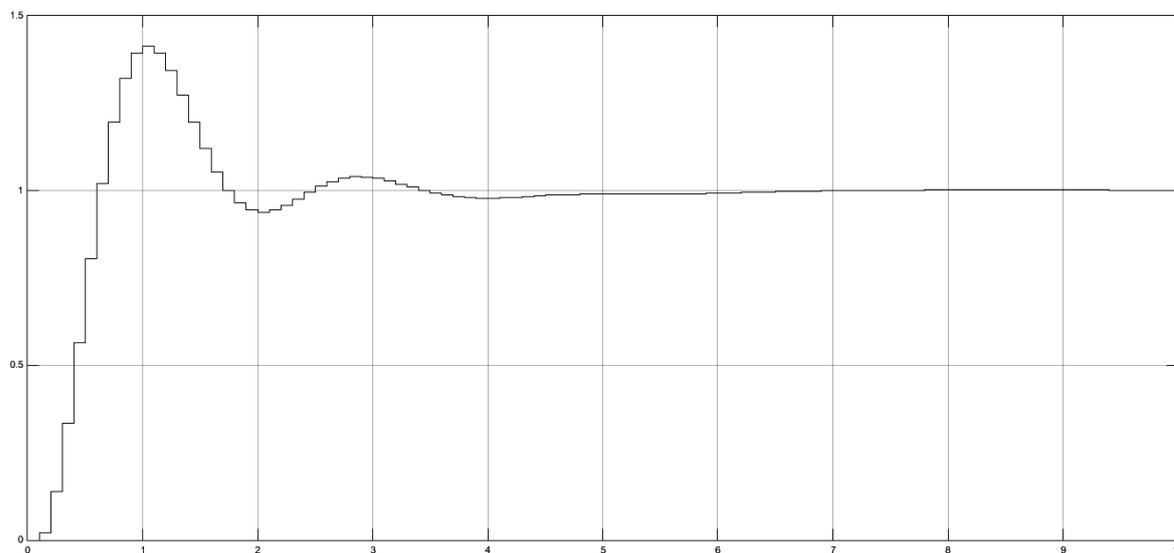


Рис.7. Переходный процесс оптимизированной системы с изменёнными на 1% коэффициентами  $q_i$

Видим, что вид переходного процесса изменился незначительно, и система сохранила устойчивость, значит, можем сделать вывод, что система – робастная.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования были получены следующие основные результаты:

1. Для непрерывного объекта 3-го порядка рассчитаны параметры дискретного ПИД-регулятора методом Циглера-Николса.
2. Смоделирована система с дискретным ПИД-регулятором, рассчитанным данным методом.
3. Произведена оптимизация системы с дискретным ПИД-регулятором, получено желаемое качество переходного процесса в системе.

4. Проведена проверка оптимизированной системы на робастность путём уменьшения каждого из коэффициентов регулятора на 1%.

### ВЫВОДЫ

По полученным результатам можно сделать вывод, что метод Циглера-Николса не учитывает требования к запасу устойчивости системы, что является его главным недостатком. После расчёта параметров регулятора требуется его ручная подстройка для улучшения качества регулирования.

Преимуществом данного метода является простота использования. На практике метод Циглера-Николса чаще всего используется для генерации начальных приближений параметров, которые затем уточняются методами оптимизации [7–10].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. СТА. – 2006. – №4 (45). URL: <http://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>.
- [2] Динамика мехатронных систем. Жмудь В.А., Французова Г.А., Востриков А.С. Учебное пособие / Новосибирск, 2014.
- [3] Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация. Васильев В.А., Воевода А.А., Жмудь В.А., Хассуонех В.А. Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2006. № 4 (46). С. 3-10.
- [4] Французова Г.А. Основы теории управления: учебно-методическое пособие. Г.А. Французова, Г.В. Саблина. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 63 с.
- [5] Востриков А.С. Основы теории непрерывных и дискретных систем регулирования. – 5-е изд., перераб. и доп.: учеб. пособие / А.С. Востриков, Г.А. Французова, Е.Б. Гаврилов. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. – 476 с.
- [6] Вадутов О.С. Настройка типовых регуляторов по методу Циглера-Николса: учебно-методическое пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 10 с.
- [7] Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control / V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON) : proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 6 p.
- [8] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method / Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20.15.2014 12th International Conference on

Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings 7040784, p. 739–744.

- [9] Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot / A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 9 p.
- [10] Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. В сб.: Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.



**Владислав Юрьевич Воробьев**, магистрант каф. Автоматики НГТУ.  
E-mail: [vladnsk.1995@mail.ru](mailto:vladnsk.1995@mail.ru)

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



**Галина Владимировна Саблина**, к.т.н, доцент каф. Автоматики НГТУ. Автор и соавтор более 40 научных и методических работ.  
E-mail: [sablina@corp.nstu.ru](mailto:sablina@corp.nstu.ru)

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

Статья поступила 28.01.2019

## Calculation and Optimization of Parameters of the Discrete PID-controller by the Ziegler-Nichols Method

Vlavislav Yu. Vorobyov, Galina V. Sablina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

*Abstract:* This article is devoted to obtaining of discrete models of continuous PID controllers, as well as the study of one of methods of automatic calculation and adjustment of controller parameters - the Ziegler-Nichols method. The parameters of the discrete PID controller will be calculated by the Ziegler-Nichols method, and systems with discrete PID controllers calculated by this method for a third-order object will be simulated and optimized. The simulation will be carried out using the Matlab software environment and the Simulink library. For the study, a continuous object of the third order is used.

*Key words:* PID-controller, Ziegler-Nichols method, Matlab Simulink, quality of the transition process, robustness.

- [1] Denisenko V.V. PID – regulatori: principi postroeniya i modifikaciyi // STA. 2006. №4 (45). URL: <http://www.cta.ru/cms/f/342946.pdf>.
- [2] Dinamika mekhatronnykh sistem. Zhmud' V.A., Frantsuzova G.A., Vostrikov A.S. Uchebnoye posobiye / Novosibirsk, 2014. [3] Tsifrovyye regulatory: tselevyye funktsii nastroyki, vybor metoda integrirovaniya, apparatnaya realizatsiya. Vasil'yev V.A., Voyevoda A.A., Zhmud' V.A., Khassuonekh V.A. Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. № 4 (46). S. 3-10.
- [3] Frantsuzova G.A. Osnovi teorii upravleniya: uchebno-metodicheskoye posobiye/ G.A. Frantsuzova, G.V. Sablina. – Novosibirsk: NGTU, 2016. – 63 s.
- [4] Vostikov A.S. Osnovi teorii neprerivnykh I disretnikh sistem regulirovaniya: uchebnoye posobiye / A.S. Vosrikov, G.A. Frantsuzova, Gavrivov E.B. – Novosibirsk: NGTU, 2008. – 476 s.
- [5] Vadutov O.S. Nastoyka tipovikh regulatorov po metodu Ziglera – Nikolsa: uchebno-metodicheskoye posobiye. – Tomsk: TPU, 2014. – 10 s.
- [6] Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control / V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L.

V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12–14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 6 p.

- [7] Calculation of regulators for the problems of mechatronics by means of the numerical optimization method / Zhmud, V., Dimitrov, L., Yadrishnikov, O. 20.15.2014 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2014 – Proceedings 7040784, p. 739–744.
- [8] Detection of unrevealed non-linearities in the layout of the balancing robot / A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow : IEEE, 2016. – 9 p.
- [9] Modern key technologies in automatics: structures and numerical optimization of regulators. Zhmud V., Yadrishnikov O., Poloshchuk A., Zavorin A. В сб.: Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012 2012. С. 6357804.



**Vladislav Yu. Vorobyov**, student of the 2nd year of the master's program of the Automation Department of the NSTU.

E-mail: [vladnsk.1995@mail.ru](mailto:vladnsk.1995@mail.ru)

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



**Galina V. Sablina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of NSTU. Author of more than 40 scientific publications.

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

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

The paper was received on 28.01.2019.

# Разработка пневмоэлектрической системы управления машиной вакуумного пылеудаления

*Д.А. Степанов, Г.В. Саблина*

*ФБГОУ ВО НГТУ, Новосибирск, Россия*

*Аннотация:* Целью данной работы является разработка пневмоэлектрической системы управления машиной вакуумного пылеудаления, предназначенной для уборки помещений промышленных предприятий. Достижение поставленной цели происходит путём решения основной задачи: разработка и описание структуры данной системы. Поставленная задача решается подбором необходимого оборудования, входящего в состав разрабатываемой системы. Актуальность данной работы заключается в необходимости поддержания чистоты воздуха, которым дышат сотрудники предприятий различных отраслей. Результаты разработки могут быть применены на предприятиях различных отраслей, имеющих проблемы с излишним содержанием промышленной пыли в воздухе.

*Ключевые слова:* автоматизация, система управления, пневматика, электрика

## ВВЕДЕНИЕ

Одной из приоритетных задач человечества является охрана природы, в частности необходимо уделять много внимания вопросу сохранности чистого атмосферного воздуха, его защите от всевозможных газов и пыли.

В настоящее время все больше сил и средств привлекается на охрану и защиту окружающей среды, ведь человечество заинтересовано в наличии достаточного запаса чистого атмосферного воздуха.

Так, например, в некоторых азиатских регионах, вследствие того, что государство не занимается должным образом вопросами, связанными с охраной окружающей среды, имеются серьёзные проблемы с чистым воздухом. Дело дошло уже до продажи очищенного воздуха.

В нашем государстве чистота и защита воздуха регламентируется Федеральным законом РФ «Об охране атмосферного воздуха». Государство заботится об охране окружающей среды и сохранения ее в состоянии, отвечающем всем современным экологическим нормам, а потому, действующие ограничения, связанные с экологическими нормами, охватывают практически все сферы деятельности граждан: ограничение выброса выхлопных газов транспортных средств, регулирование и контроль промышленных предприятий, и многое другое.

Производственный экологический контроль является важным инструментом в области охраны окружающей среды. Он обязует предприятия осуществлять регулярные мероприятия по охране окружающей среды и рационально использовать ресурсы, а также выполнять законодательные требования в вопросах природоохраны.

В связи с требованиями, предъявляемыми к качеству воздуха в помещениях промышленных предприятий согласно ГОСТ 12.1.005-76, необходимо применение устройств для очистки помещений.

Загрязнённый воздух, не соответствующий экологическим требованиям, должен подвергаться очистке.

Для промышленного пылеудаления, сбора сухой пыли и мелкого мусора, а также уборки помещений, предлагается разработать систему управления машиной вакуумного пылеудаления, с питанием от самой машины.

Целью данной работы является разработка системы управления машиной вакуумного пылеудаления, способной выполнять требуемые задачи в заданном диапазоне температур.

Разрабатываемая система должна соответствовать требованиям, отражённым в техническом задании.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ АВТОМАТИЗАЦИИ УЧАСТКА

В связи с поставленной целью в данном проекте решаются следующие задачи:

- Разработка и описание структуры системы;
- Подбор оборудования, необходимого для стабильного функционирования системы;
- Создание технической документации, связанной с разработкой системы.

В состав оборудования входят следующие элементы:

- компрессор;
- блок охлаждения;
- фильтр сжатого воздуха (2 шт.);
- осушитель воздуха (2 шт.);
- ресивер (2 шт.);
- импульсный клапан (8шт.);
- шиберный затвор (4шт.).

Также к системе предъявляются дополнительные требования по эксплуатации:

- Рабочий температурный диапазон машины  $-40^{\circ} \dots +30^{\circ}\text{C}$ ;
- Питание системы:  $24\text{ V DC}$ .

## 2. АКТУАЛЬНОСТЬ ПРОБЛЕМЫ

На подавляющем большинстве современных промышленных предприятий используется оборудование вакуумного пылеудаления, питающегося от сети. Применение данного оборудования необходимо для обеспечения должного уровня условий труда.

Ряд компаний по производству и реализации машин вакуумного пылеудаления предлагает решение данной проблемы путём использования выпускаемой продукции.

В данной работе решается задача управления машиной вакуумного пылеудаления. Для этого в качестве основы взят каталог продукции компании ООО «Камоцци Пневматика» [1], которая является крупным поставщиком пневматического оборудования на Российский рынок.

Для сравнения с аналогами разматываемой системы привлечены данные из статьи, расположенной в онлайн библиотеке, посвящённой тормозному приводу грузового автомобиля [6].

## 3. РАЗДЕЛ АВТОМАТИЗАЦИИ

Из компрессора подаётся сжатый воздух, температура которого  $80^{\circ}\text{C}$ , в блок охлаждения, где его температура начинает опускаться, и, вследствие этого, из воздуха начинает выделяться большое количество влаги, после чего остатки влаги отделяются от воздуха с помощью фильтра, из которого, с помощью конденсатоотводчика происходит отвод конденсата.

После этого воздух попадает в два осушителя, где точка росы снижается до  $-40^{\circ}\text{C}$ . Затем осушенный воздух попадает в два

ресивера, на одном из которых установлены импульсные клапаны продувки рукавных фильтров, а от второго отходит питание на шкаф управления шибберными затворами, которые, в свою очередь, перекрывают каналы сбора пыли и мелкого мусора.

Для того чтобы в некоторых элементах системы не застывала влага, при работе в отрицательном диапазоне температур, необходима установка обогревающих элементов (ленточных нагревателей).

Вся система устанавливается на машину вакуумного пылеудаления и работает за счёт штатной системы питания машины. Питание системы –  $24\text{ V DC}$ .

Принципиальная схема подключений представлена на *Рис. 1*; пневматическая схема системы представлена на *Рис. 2*.

В разрабатываемой системе имеет место наличие двух шкафов управления. Первый из них представлен на *Рис. 3*. Он установлен сразу после блока охлаждения, и совмещает в себе две функции:

- Фильтрует охлаждённый воздух и отводит скопившийся конденсат;
- Защищает ресивер от переизбытка давления, с помощью установленного в нем клапана сброса избыточного давления.
- Второй из них – шкаф управления шибберными затворами (*Рис. 4*), включающий в себя:
  - фильтр-регулятор воздуха;
  - манометр;
  - четыре пневматических распределителя воздуха (по одному на каждый шибберный затвор);
  - четыре клеммы;
  - четыре разъёма;
  - четыре катушки;
  - набор фитингов и трубок для подключения.

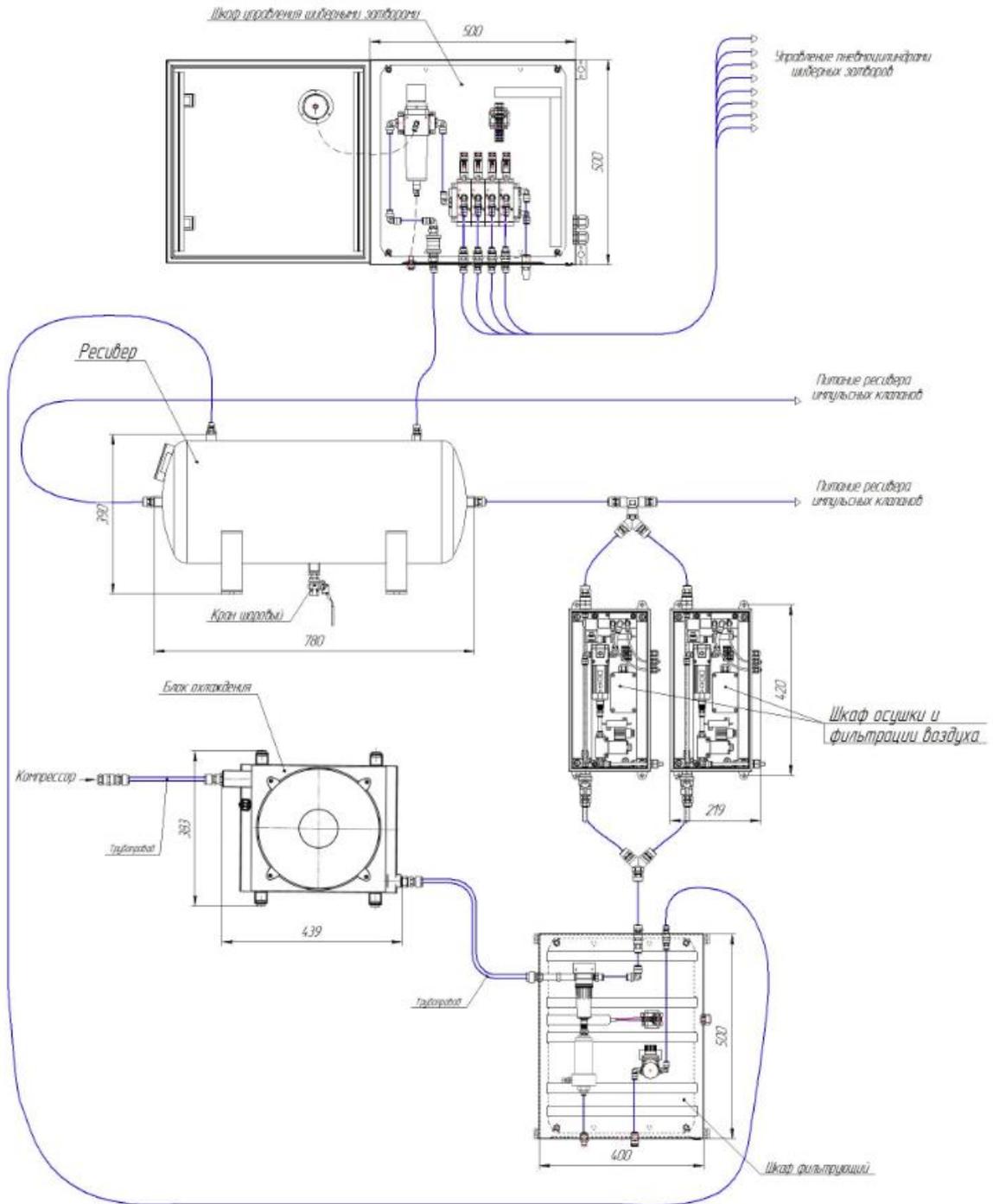


Рис.1. Принципиальная схема подключений

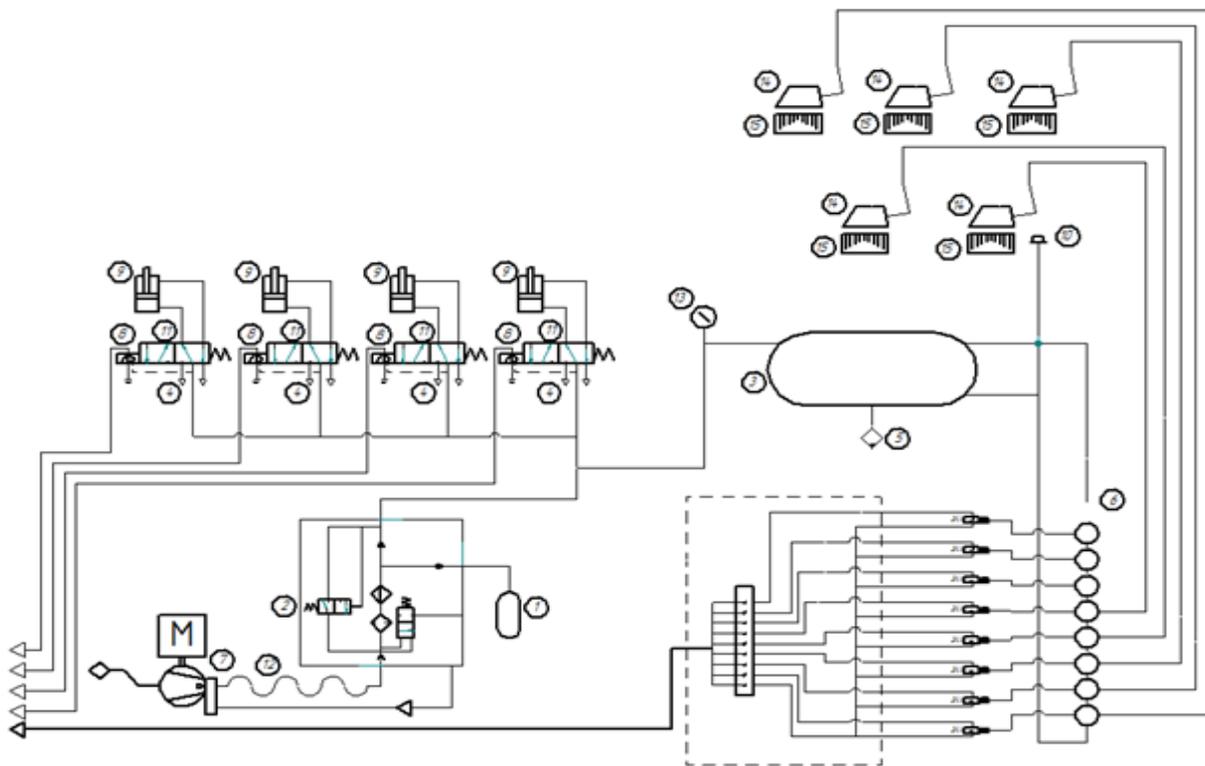


Рис.2. Пневматическая схема системы

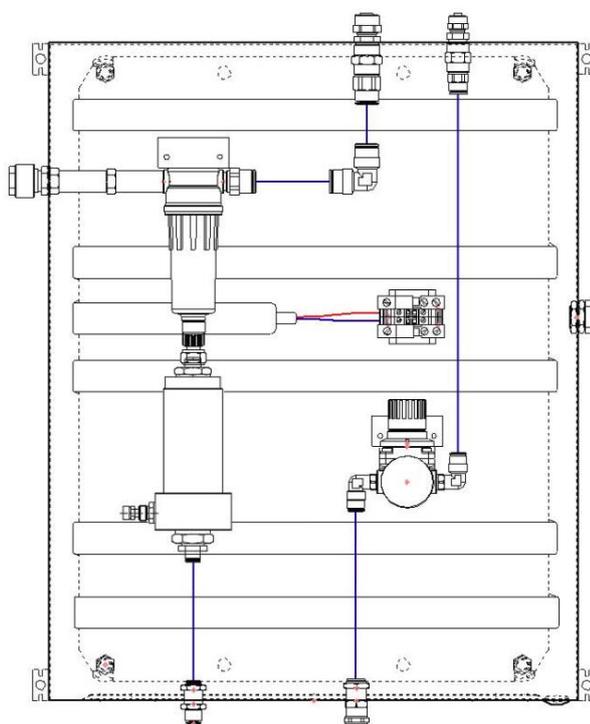


Рис. 3. Расположение элементов в фильтрующем шкафу

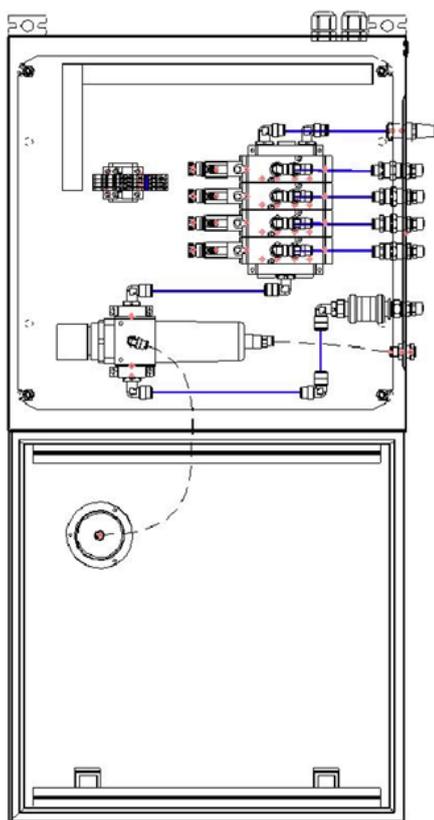


Рис. 4. Расположение элементов в шкафу управления шиберными затворами

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы получены следующие результаты:

- Спроектирована пневмоэлектрическая система управления машиной вакуумного пылеудаления. Разработка велась на базе продукции компании ООО «Камоцци Пневматика». Все компоненты системы совместимы между собой.
- Разработана пневматическая схема управления системой.
- Разработан комплект технической документации к системе.

Разработанная система предназначена для использования в корпусах промышленных предприятий, в которых имеются высокие требования к классу чистоты воздуха для стабильной работы оборудования, а также в тех случаях, когда загрязнение воздуха делает невозможным работу персонала, нарушая условия труда.

Достоинства разработанной системы:

- Питание системы происходит непосредственно от машины вакуумного пылеудаления, следовательно, нет практически никаких ограничений в маневрировании

пылеудаляющей машины, в сравнении с аналогами, питание которых происходит от стационарной сети. Помимо этого, нет необходимости в использовании источника бесперебойного питания.

- Установка обогревающих лент исключает ситуации, связанные с застыванием конденсата в системе при работе в отрицательном диапазоне температур.
- Высокий класс очистки воздуха позволяет улавливать мелкодисперсную пыль.
- Использование комплектующих высокого качества повышает общую надёжность и безотказность системы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Пневматическая аппаратура. Большой каталог. Версия 8.8. ООО «Камоцци Пневматика», 2018. URL: <http://catalog.camozzi.ru/>
- [2] ГОСТ 24856-2014 Арматура трубопроводная. Термины и определения. – М. Стандартинформ, 2015. 74 с.
- [3] ГОСТ 28567-90 Компрессоры. Термины и определения. – Взамен ОСТ 26.12.2032-86; Введ. 01.07.91. – М. Стандартинформ, 2005. 20 с.
- [4] Пневматика для всех. От теоретических основ к практическим навыкам. ООО «Камоцци Пневматика», 2016. URL: <http://did.camozzi.ru/#!d01g01s01p01>
- [5] ГОСТ 2.701-2008 Единая система конструкторской документации. – Взамен ГОСТ 2.701-84; Введ. 07.10.2008. – М. Стандартинформ, 2009. 14 с.
- [6] Онлайн-библиотека sinref.ru. 2019. URL: [http://sinref.ru/avtomobili/KAMAZ/005\\_kamaz\\_4308\\_rukovodstvo/023.htm](http://sinref.ru/avtomobili/KAMAZ/005_kamaz_4308_rukovodstvo/023.htm)



**Даниил Андреевич Степанов**, магистрант второго года обучения каф. Автоматики НГТУ.  
E-mail: [acmilan080@mail.ru](mailto:acmilan080@mail.ru)

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



**Галина Владимировна Саблина**, к.т.н., доцент каф. Автоматики НГТУ. Автор и соавтор более 40 научных и методических работ.

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

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

Статья поступила 12.02.2019

## Development of a Pneumoelectrical Control System of Machine of the Vacuum Dust Extraction

Daniil A. Stepanov, Galina V. Sablina

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

*Abstract:* The purpose of this work is development of a pneumoelectrical control system of machine of the vacuum dust extraction. This system designed for cleaning at industrial enterprises. Achievement of a goal happens a solution of the main objective: development and description of structure of this system. The objective is solving by selection of the necessary equipment, which is a part of the developed system. The relevance of this work consists in need of maintenance of purity of air, which the staff of the enterprises of various industries breathes. Results of development can be applying at the enterprises of various industries having problems with the excessive content of industrial dust in the air.

*Key words:* automation, control system, pneumatic, electric.

### REFERENCES

- [1] Pneumatic equipment. Large catalog. Version 8.8. ООО «Kamozzi Pnevmatika», 2018. URL: <http://catalog.camozzi.ru/>
- [2] GOST 24856-2014 Pipefittings. Terms and Definitions. - M. Standardinform, 2015. 74 p.
- [3] GOST 28567-90 Compressors. Terms and Definitions. - Instead of OST 12/26/2032-86; 07/01/1. - M. Standardinform, 2005. 20 p.
- [4] Pneumatics for all. From theoretical foundations to practical skills. ООО «Kamozzi Pnevmatika», 2016. URL: <http://did.camozzi.ru/#!d01g01s01p01>
- [5] GOST 2.701-2008 Unified system for design documentation. Instead of GOST 2.701-84; Enter 10/7/2008. - M. Standardinform, 2009. 14 p.
- [6] Online library sinref.ru. // 2019. URL: [http://sinref.ru/avtomobili/KAMAZ/005\\_kamaz\\_430\\_8\\_rukovodstvo/023.htm](http://sinref.ru/avtomobili/KAMAZ/005_kamaz_430_8_rukovodstvo/023.htm)



**Daniil Andreevich Stepanov**, master program student of the second year, Department of Automation in NSTU.

E-mail: [acmilan080@mail.ru](mailto:acmilan080@mail.ru)

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



**Galina V. Sablina**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Automation of NSTU. Author of more than 40 scientific publications.

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

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

The paper was relieved on 12.02.2019

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

### **Содержание раздела:**

- ◇ А.И. Незванов, В.Г. Трубин, М.В. Трубин. Рекомендации по выбору и подключению реле для коммутации бытовых нагрузок. ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 22–32.

# Рекомендации по выбору и подключению реле для коммутации бытовых нагрузок

А.И. Незванов, В.Г. Трубин, М.В. Трубин

ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В данной статье рассматривается проблема, с которой сталкивается каждый разработчик электронных устройств – выбор электромагнитного реле для коммутации цепей постоянного и переменного тока. Электромагнитные реле имеют множество параметров, разобраться в которых под силу только опытному разработчику, а неправильный выбор реле способен нарушить работу изготовленного устройства и привести к различным проблемам. В данной статье рассмотрены основные характеристики переменного напряжения, электромагнитных реле, а также обсуждаются различные схемы подключения.

**Ключевые слова:** электромагнитное реле, переменный ток, коммутация, управление нагрузкой с помощью микроконтроллера, ограничитель напряжения, бросок тока, холодный пуск лампы, бросок напряжения.

## ВВЕДЕНИЕ

В процессе разработки электронных устройств часто требуется добавить возможность коммутировать различные электрические цепи. Самым очевидным способом реализации данной задачи является использование электромагнитного реле. Но это устройство не такое простое, как кажется на первый взгляд. Оно имеет множество характеристик, которые необходимо учитывать, так как от них зависит длительная и бесперебойная работа устройства. Для понимания базовых принципов использования электромагнитных реле в ходе данного материала будут рассмотрены их основные параметры.

Также будут рассмотрены различные схемы подключения реле и приведены осциллограммы происходящих в них процессов.

## 1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

### 1.1. Общие сведения

Переменный ток (*Alternating Current - AC*) [1] – электрический ток, который с течением времени изменяется по величине и направлению. В отличие от постоянного тока, график которого в зависимости от времени представляет собой прямую, переменный ток имеет синусоидальную форму (Рис. 1). Частота переменного тока для бытового и промышленного использования в Российской Федерации – 50 Гц, то есть за 1 секунду ток меняет свое направление 50 раз (длительность периода – 20 мс).

Потребители переменного тока имеют такой параметр, как коэффициент мощности  $\cos\phi$  – безразмерная физическая величина, характеризующая потребителя переменного электрического тока с точки зрения наличия в нагрузке реактивной составляющей [2]. Он показывает, насколько сдвигается по фазе переменный ток, протекающий через нагрузку,

относительно приложенного к ней напряжения (Рис. 2, пунктирная линия – ток, непрерывная – напряжение).

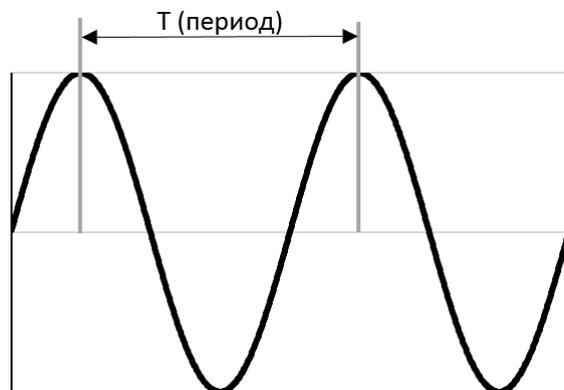


Рис. 1. График переменного тока

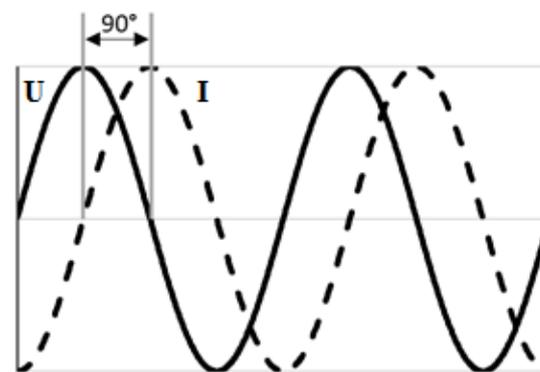


Рис. 2. График запаздывания тока от напряжения

На графике ток сдвинут на  $90^\circ$  (для наглядности), то есть на четверть периода. Например, электрооборудование имеет  $\cos\phi = 0,8$ , что соответствует углу  $\arccos 0,8 \approx 36,8^\circ$ . Этот сдвиг происходит из-за наличия в потребителе электроэнергии нелинейных компонентов – ёмкостей и индуктивностей (например, обмотки электродвигателей, трансформаторов и электромагнитов). Для дальнейшего понимания происходящего

требуется учет того факта, что, чем выше коэффициент мощности (максимум 1), тем более эффективно потребитель использует получаемую из сети электроэнергию (то есть большее количество энергии преобразуется в полезную работу) – такую нагрузку называют резистивной («*resistive load*» в документации к реле). При резистивной нагрузке ток в цепи совпадает с напряжением. А при низком коэффициенте мощности нагрузку называют реактивной, то есть часть потребляемой мощности не совершает полезной работы.

Таблица ниже демонстрирует классификацию потребителей по коэффициенту мощности.

Таблица. 1

**Классификация потребителей переменного тока**

Качество потребителя	cos φ
Высокое	0,95..1
Хорошее	0,8..0,95
Удовлетворительное	0,65..0,8
Низкое	0,5..0,65
Плохое	0..0,5

Следующая таблица демонстрирует коэффициент мощности распространённых в быту потребителей электроэнергии.

Таблица. 2

**Коэффициент мощности бытовых приборов**

Потребитель	Коэффициент мощности cosφ
Электроплита	1
Электрочайник	1
Бытовой холодильник	0,65
Компьютер	0,95
Лампа накаливания	1
Электроинструмент	0,8
Микроволновая печь	0,85
Светодиодная лампа	0,9

**1.2. Категории применения коммутационных устройств**

Для стандартизации применения коммутационных устройств были определены категории потребителей переменного тока. Знание этих категорий необходимо при выборе реле и других коммутационных устройств, так как производители используют эти обозначения при отражении допустимых токов и напряжений. Таблица ниже приведена для ознакомления, источником является ГОСТ Р 50030.X [3]. Этот документ является переводом международного стандарта МЭК 60947.

Таблица. 3.

**Категории применения коммутационных устройств**

Категория применения	Область применения
АС-1	Электрические цепи с сопротивлением; неиндуктивная или малоиндуктивная нагрузка
АС-2	Пуск и торможение противотоком электродвигателей с фазным ротором
АС-3	Прямой пуск электродвигателей с короткозамкнутым ротором, отключение вращающихся двигателей (может предусматривать случайные повторно-кратковременные включения или торможение противотоком ограниченной длительности, например при наладке механизма)
АС-4	Пуск и торможение противотоком электродвигателей с короткозамкнутым ротором. Для таких режимов работы используются спаренные контакторы, между которыми устанавливается механическая (и не всегда электрическая) блокировка (она не допускает одновременного включения аппаратов). В этом режиме контакторы имеют меньший номинальный ток и ресурс.
АС-5a, АС-5b	Коммутирование разрядных электрических ламп и ламп накаливания соответственно
АС-6a, АС-6b	Управление трансформаторами и батареями конденсаторов соответственно
АС-7a, АС-7b	Коммутирование слабоиндуктивных и двигательных нагрузок в бытовых сетях соответственно
АС-8a, АС-8b	Коммутирование герметичных двигателей компрессоров холодильников (сочетание двигателя и компрессора в одном корпусе) с ручным или автоматическим взводом расцепителей перегрузки соответственно
АС-11	Управление электромагнитами переменного тока
АС-12	Контроль над омическими и неизменными во времени нагрузками
АС-13	Контроль над не меняющимися с течением времени нагрузками
АС-14	Управление электрическими магнитами небольшой мощности $N \leq 72$ Вт
АС-15	Контроль над электромагнитами с $N \geq 0,072$ киловатт

## 2. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕЛЕ

### 2.1. Общие сведения

Электромагнитное реле [4] (англ. *Electromagnetic relay*) – электромеханическое устройство, которое предназначено для коммутации электрических цепей. Оно имеет в своей конструкции электромагнит, при включении которого срабатывает механизм, замыкающий или размыкающий контакты. Благодаря тому, что управляющая цепь изолирована от выходных контактов, с помощью реле можно управлять высоковольтной нагрузкой, используя низковольтный сигнал.

Электромагнитное реле имеет множество характеристик. Рассмотрим основные из них.

### 2.2. Контактная схема

Контактная схема отражает характер переключения при подаче напряжения на обмотку реле. Обозначается двумя знаками, первый из которых отражает количество коммутируемых групп, а второй – тип переключения.

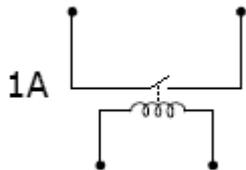


Рис. 3. Контактная схема 1A

Контактная схема 1A (Рис. 3) имеет одну нормально разомкнутую группу (*H.P./NO – normally open*), то есть при подаче напряжения на обмотку реле происходит замыкание одного контакта.

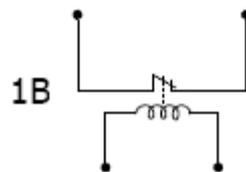


Рис. 4. Контактная схема 1B

Контактная схема 1B (Рис. 4) имеет одну нормально замкнутую группу (*H.З./NC – normally closed*), то есть при подаче напряжения на обмотку реле происходит размыкание одного контакта.

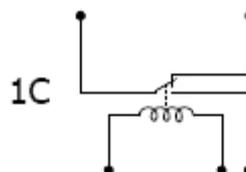


Рис. 5. Контактная схема 1C

Контактная схема 1C (Рис. 5) имеет одну группу контактов, но в отличие от типов А и В, подвижный контакт при подаче напряжения на обмотку реле переключается от одного контакта к другому, то есть реле с такой контактной схемой работает как переключатель.

Контактная схема 2А (Рис. 6) имеет две нормально разомкнутых группы (*H.P./NO – normally open*), то есть при подаче напряжения на обмотку реле происходит замыкание двух контактов.

Также существуют реле с другими вариантами контактных схем: 3А, 2С, 3С и т. п.

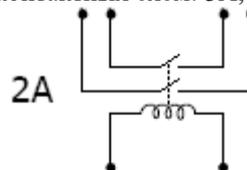


Рис. 6. Контактная схема 2А

### 2.3. Напряжение обмотки

Параметр электромагнитного реле, определяющий величину напряжения, которое требуется приложить к обмотке для её включения.

Наиболее распространённые напряжения:

- 5 В постоянного тока (VDC) – часто используются в схемах с 5 В питанием, например, в схемах с микроконтроллерами;
- 12 В постоянного тока – управление в автомобильных цепях.
- 24 В постоянного тока – управление в промышленных контроллерах.
- 220 В переменного тока (VAC) – управление в бытовых и промышленных сетях.

### 2.4. Ток коммутации и срок службы

Возможно самый важный, и в то же время сложный в выборе реле параметр. Он определяет величину тока, которую реле способно коммутировать, сохраняя дальнейшую работоспособность на долгое время. Рассмотрим в качестве примера широко распространённое реле с контактной схемой 1C *SONGLE SRD-05-VDC-SL-C* [5] (Рис. 7).



Рис. 7. Реле *SONGLE SRD-05VDC-SL-C*

На данном реле производитель указывает следующие параметры 10А 250VAC. Но в действительности, при коммутации высокоиндуктивной нагрузки, такое реле не сможет выдержать и 3 ампер при 250VAC.

В документации производителя имеется следующая таблица (Рис. 8):

CONTACT RATING		
Item	Type	SRD
	FORM C	FORM A
Contact Capacity	7A 28VDC	10A 28VDC
Resistive Load (cosφ=1)	10A 125VAC 7A 240VAC	10A 240VAC
Inductive Load (cosφ=0.4 L/R=7msec)	3A 120VAC 3A 28VDC	5A 120VAC 5A 28VDC
Max. Allowable Voltage	250VAC/110VDC	250VAC/110VDC
Max. Allowable Power Force	800VAC/240W	1200VA/300W
Contact Material	AgCdO	AgCdO

Рис. 8. Таблица допустимых токов

Исходя из таблицы, становится ясно, что при коммутации «идеальной» нагрузки (тип нагрузки AC-1, то есть нагревательного элемента, и прочих, которые полностью преобразовывают получаемую энергию в работу) реле способно выдержать всего лишь 7 А. А при коммутации индуктивной нагрузки (имеющей высокую реактивную составляющую) производитель вообще не указал ток.

Для сравнения рассмотрим реле Omron G2RL-1A-E-5DC [6] с контактной схемой 1A (Рис. 9).



Рис. 9. Реле Omron G2RL-1A-E-5DC

Производитель указывает на нем допустимый ток 16 А при 250 VAC. Но в документации есть следующая таблица (Рис. 10).

Model	Contact ratings
G2RL-1(A)-E	16 A at 250 VAC (cosφ=1)
	16 A at 24 VDC (L/R=0 ms)
	AC15: 3 A at 240 VAC (NO) 1.5 A at 240 VAC (NC)
	DC13: 2.5 A at 24 VDC (NO), 50 ms

Рис. 10. Таблица допустимых токов

Из неё видно, что 16 А реле способно выдержать только при резистивной нагрузке (cosφ = 1, категория нагрузки AC-1), а при коммутации высокоиндуктивной нагрузки (категория нагрузки AC-15, например электромагниты большой мощности) оно способно выдержать ток до 3 ампер. Но помимо этой, в документации есть еще одна таблица

(Рис. 11), в которой указан ресурс реле по количеству коммутаций.

G2RL-1-E	16 A at 250 VAC (cosφ=1)	30,000 operations min.
	8 A at 250 VAC (cosφ=0.4)	200,000 operation min.

Рис. 11. Таблица ресурса по количеству коммутаций

Из неё видно, что при токе 16 А при 250 VAC cosφ = 1) реле должно сработать минимум 30 тысяч раз, а при токе 8 А при 250 VAC (cosφ = 0,4) реле должно сработать минимум 200 тысяч раз.

Рассчитаем примерный срок службы такого реле. При максимальной резистивной нагрузке, при условии включения реле раз в час, его ресурса в 30 тысяч включений хватит примерно на 3,5 года. Следовательно, при выборе реле необходимо руководствоваться не только таблицей допустимых токов, но и сроком службы, так как при частом включении оно может быстро израсходовать ресурс и выйти из строя.

## 2.5. Время переключения

Этот параметр отражает время, за которое реле изменяет состояние контактов. Для реле SONGLE SRD-05-VDC-SL-C время включения (operation time) составляет не более 10 мс, а выключения (release time) – не более 5 мс.

PERFORMANCE (at initial value)		
Item	Type	SRD
	Contact Resistance	
Operation Time		10msec Max.
Release Time		5msec Max.

Рис. 12. Время переключения реле SONGLE SRD-05VDC-SL-C.

## 2.6. Разновидности реле

Рассмотрим три разновидности реле [7]:

- Сигнальные реле – коммутация управляющих сигналов. От мощных реле отличаются более высокой скоростью коммутации и невысоким током.

- Мощные реле – коммутация силовых цепей. Согласно устоявшейся международной классификации, максимальный коммутируемый ток таких реле составляет 30 А;

- Контактторы – коммутация нагрузок мощностью от 100 Вт до 1 МВт.

Рассмотрим основные отличия. В качестве примера сигнального реле рассмотрим OMRON G5V-2 [8], мощного реле – OMRON G2RL, контактора – ИЭК серии КМИ [9].

Сравнение параметров:

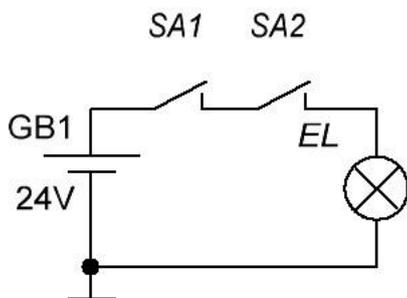
- Скорость срабатывания – максимальное время включения/выключения:  
сигнальное реле – 7 мс/3 мс;  
мощного реле – 15 мс/5 мс;  
контактор – 12-35 мс/4-20 мс.

- Максимальное коммутируемое напряжение:  
 сигнальное реле – 125 VAC;  
 мощного реле – 440 VAC;  
 контактор – 660 VAC.
- Максимальный коммутируемый ток:  
 сигнальное реле – 2 A;  
 мощного реле – 16 A;  
 контактор – 95 A.

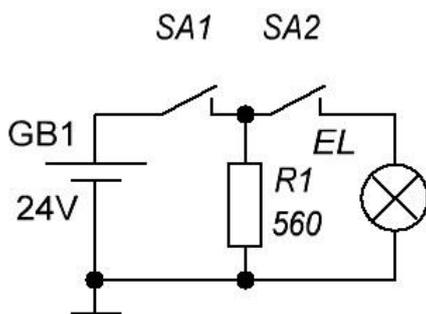
Данное сравнение отражает общие отличия трёх разновидностей реле. Однако можно найти как мощное реле с малым током коммутации и высокой скоростью срабатывания, так и сигнальное реле с большим током коммутации и высоким напряжением, но это частные случаи.

### 2.7. Минимальный ток

Этот параметр отражает минимальный ток, который должен протекать через замыкаемые контакты реле, чтобы установился стабильный контакт. При коммутации силовых цепей данный параметр практически не влияет работу реле, а при коммутации управляющих сигналов необходимо его учитывать. Как правило, необходимый минимальный ток составляет десятки миллиампер. Если в коммутируемой цепи ток не достигает таких значений, то необходимо установить нагрузочный резистор. Показанная на *Рис. 13* схема в некоторых случаях может работать некорректно, а схема на *Рис. 14* обеспечивает стабильное замыкание контактов реле.



*Рис. 13.* Схема последовательного включения двух реле



*Рис. 14.* Схема последовательного включения двух реле с нагрузочным резистором.

Сопротивление резистора  $R1$  рассчитывается исходя из минимально необходимого тока коммутации. Для реле *OMRON G2RL*, согласно документации, минимальный ток, при котором устанавливается стабильный контакт, составляет 40 мА при 24 VDC (параметр *Contacts, Failure rate*). То есть  $R1 = U / I = 24 / 0,04 = 600 \text{ Ом}$ .

В разных версиях документации на одно и то же изделие производитель может не указывать тот или иной параметр. При отсутствии интересующего параметра в имеющейся документации, стоит поискать другие версии документации, возможно в них он указан.

### 3. ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ РЕЛЕ

Твердотельное реле [10] (*TTP*) – электронное устройство, являющееся типом реле без механических движущихся частей, служащее для включения и выключения нагрузки с помощью низких напряжений, подаваемых на управляющие клеммы. *TTP* содержит оптотранзистор, который реагирует на входной управляющий сигнал и включает полупроводниковый ключ. Этот тип реле может использоваться в сетях постоянного и переменного тока. Устройство применяется для тех же задач, что и обычное реле, но не содержит движущихся частей.

Преимуществом *TTP* перед электромеханическим реле является более высокая скорость переключения, отсутствие ограничения на количество переключений.

Недостатком *TTP*, из-за которого они на данный момент не получили широкого распространения, является их меньшая приспособленность к кратковременным перегрузкам (превышение предельно допустимых токов и напряжений).

В России разработкой и производством *TTP* занимается ЗАО «Протон-импульс» [11].

### 4. СПОСОБЫ ПОДКЛЮЧЕНИЯ РЕЛЕ

#### 4.1. Подключение с защитным диодом

Схема с защитным диодом, подключенным параллельно управляющей катушке реле, является наиболее распространённой (см. *Рис. 15*).

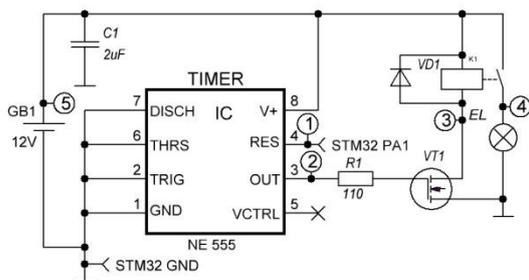


Рис. 15. Схема управления реле с защитным диодом

На представленной схеме в качестве источника управляющего сигнала выступает микроконтроллер (МК) STM32F100, который формирует прямоугольный управляющий сигнал без дребезга. Для повышения напряжения +3,3 В на выходе МК до +12 В, достаточного для открытия полевого транзистора VT1, используется микросхематаймер NE555 [12] в режиме преобразователя уровня сигналов. Более подробно об этом режиме работы NE555 можно прочитать в статье [13]. Транзистор VT1 (STP35NF10 [14]) при подаче напряжения на затвор открывается, к обмотке реле (SCHRACK RT334012 [15]) прикладывается напряжение и начинает протекать ток. Реле коммутирует цепь питания лампы накаливания (автомобильная лампа, 12 В, 5 Вт). Диод VD1 (1N4007 [16]) выступает в качестве защиты транзистора VT1 от выброса напряжения, который возникает при разрыве питания обмотки реле. В собранном виде схема представлена на Рис. 16.

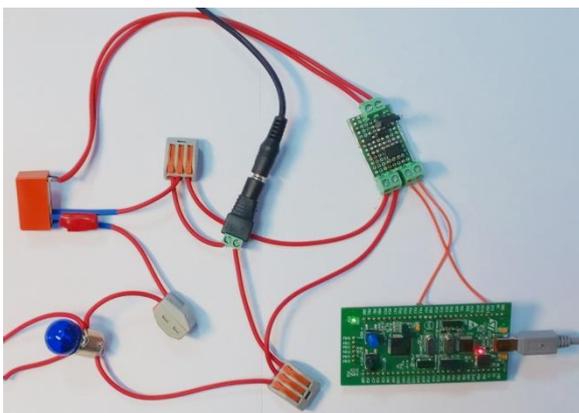


Рис. 16. Схема управления реле (универсальная для всех экспериментов), собранная на макетной плате

Представленные ниже графики (Рис. 17-26) отражают процессы, протекающие в схеме, показанной на Рис. 15.

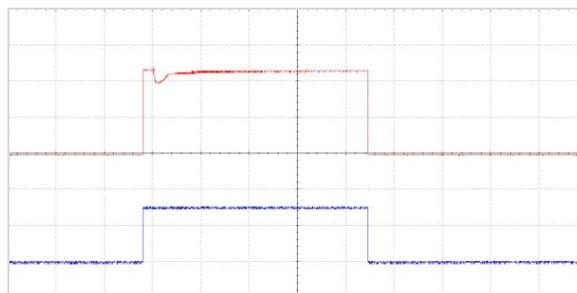


Рис. 17. Сигнал с вывода 3 NE555 (верхний сигнал, точка 2, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал, точка 1, 2 В/кл.), 25 мс/кл

На Рис. 17 отображена зависимость выходного (верхнего) сигнала с NE555 от входного (нижнего).

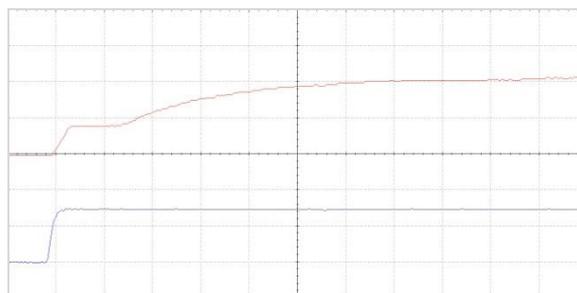


Рис. 18. Сигнал с вывода 3 NE555 (верхний сигнал, точка 2, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал, точка 1, 2 В/кл.), 250 нс/кл

На Рис. 18 отображена зависимость выходного (верхнего) сигнала с NE555 от входного (нижнего) с увеличенным масштабом по времени.

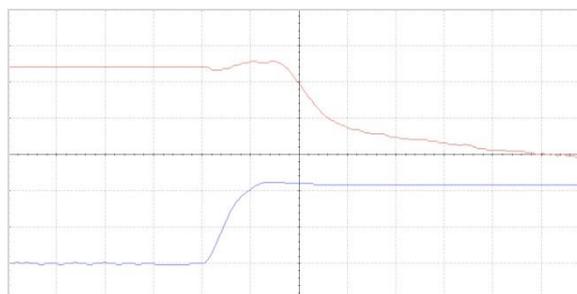


Рис. 19. Напряжение на стоке транзистора (верхний сигнал, точка 3, 5 В/кл.), сигнал с вывода 3 NE555 (нижний сигнал, точка 2, 5 В/кл.), 50 нс/кл

На Рис. 19 отображена задержка открытия транзистора VT1 при подаче управляющего сигнала с NE555.

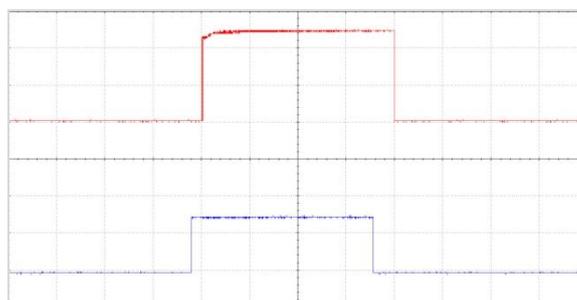


Рис. 20. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5В/кл.), сигнал с вывода 3 NE555 (нижний сигнал, точка 2, 5 В/кл.), 25 мс/кл

На Рис. 20 отображена задержка включения / выключения лампы от управляющего сигнала с NE555.

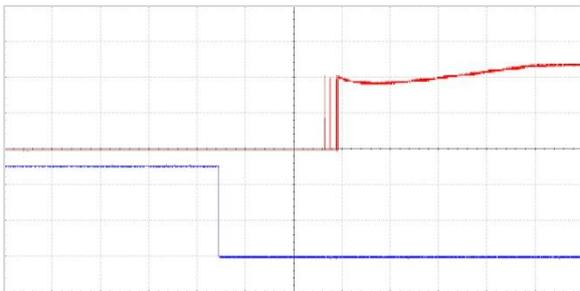


Рис. 21. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), напряжение на стоке транзистора (нижний сигнал, точка 3, 5 В/кл.), 2.5 мс/кл

На Рис. 21 отображена задержка между открытием транзистора VT1 и включением лампы. Также можно заметить дребезг контактов реле и следующую за ним просадку напряжения питающей линии, вызванную включением лампы.

На Рис. 22 отображена задержка между началом подачи управляющего импульса с МК и включением лампы, управляемой реле. Также можно заметить дребезг контактов реле.

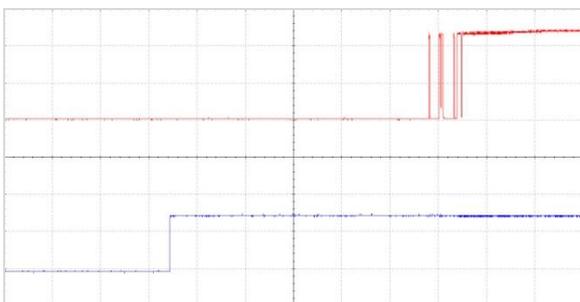


Рис. 22. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал, точка 1, 2 В/кл.), 1 мс/кл

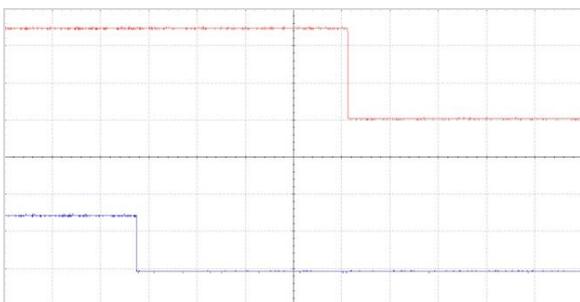


Рис. 23. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал, точка 1, 2 В/кл.), 2.5 мс/кл

На Рис. 23 отображена задержка между окончанием подачи управляющего сигнала с МК и отключением лампы.

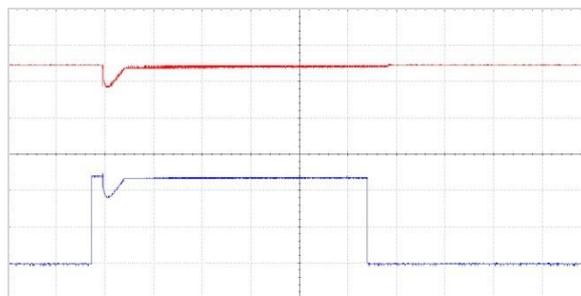


Рис. 24. Напряжение питания (верхний сигнал, точка 5, 5 В/кл.), сигнал с вывода 3 NE555 (нижний сигнал, точка 3, 5 В/кл.), 25 мс/кл

На Рис. 24 отображена просадка напряжения в питающей линии в момент включения реле, она объясняется тем, что во время проведения экспериментов был использован 12 Вт источник питания на 12 В, мощности которого не хватает для «холодного» пуска лампы [13].

На Рис. 25 отображен ток «холодного» пуска лампы накаливания. Он превышает номинальный ток лампы в 4 раза, и в 2 раза превышает рабочий ток источника питания, что вызывает просадку напряжения питающей линии.

При выборе реле необходимо учитывать, что некоторые нагрузки имеют большой пусковой ток, который может превышать номинальный ток для выбранного реле в несколько раз, что может привести к «свариванию» контактов реле.

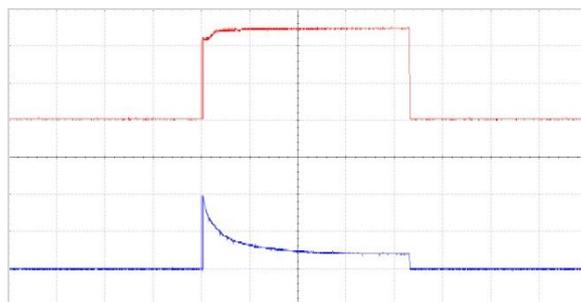


Рис. 25. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), ток проходящий через лампу (нижний сигнал, точка 4, 1 А/кл.), 25 мс/кл



Рис. 26. Напряжение на лампе (дребезг контактов реле), 5 В/кл., точка 4, 100 мкс/кл

На Рис. 26 отображен дребезг контактов реле при его включении. Природа этого явления лежит в соударении контактных площадок, которые «отскакивают» при ударе друг о друга. Постепенно контакты прижимаются всё сильнее, и устанавливается стабильный контакт.

#### 4.2. Подключение без защитного диода

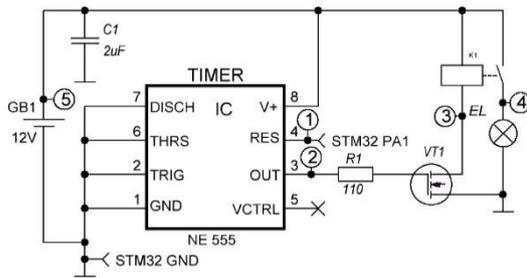


Рис. 27. Схема управления реле без защитного диода

В данном варианте схемы отсутствует диод, защищающий транзистор  $VT1$  от выброса напряжения при разрыве цепи питания обмотки реле. Во избежание выхода транзистора из строя, он был заменён на *STP10NK80ZFP* [17], который способен работать с напряжением сток-исток до 800 В.

Представленные ниже графики (Рис. 28-31) отражают процессы, протекающие в схеме, показанной на Рис. 27.

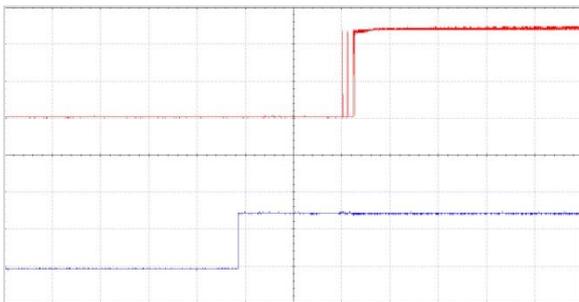


Рис. 28. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал, точка 1, 2 В/кл.), без защитного диода, 2,5 мс/кл.

На Рис. 28 отображена задержка между управляющим сигналом от МК и включением лампы. Задержка включения составляет примерно 5 мс.

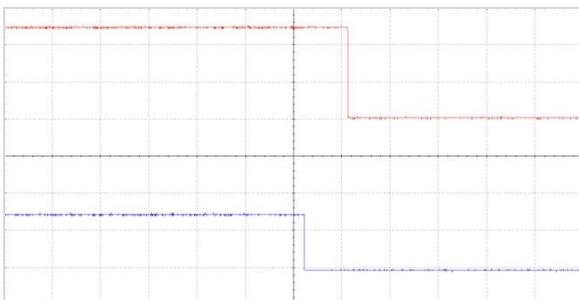


Рис. 29. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал, точка 1, 2 В/кл.), без защитного диода, 2,5 мс/кл

На Рис. 29 отображена задержка выключения лампы. При прекращении подачи напряжения на обмотку реле лампа продолжает гореть еще на протяжении примерно 2,5 мс. В

сравнении со схемой, в которой используется защитный диод, размыкание контактной группы реле происходит быстрее в ~ 4 раза.

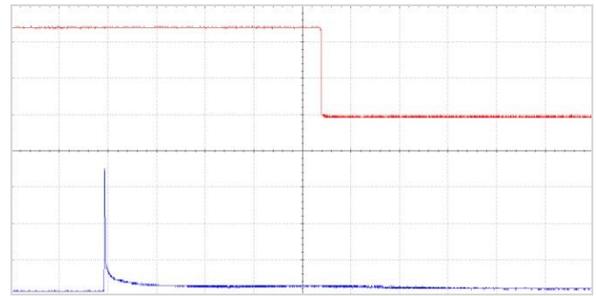


Рис. 30. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), напряжение на стоке транзистора (нижний сигнал, точка 3, 200 В/кл.) без защитного диода, 500 мкс/кл.

На Рис. 30 изображён выброс напряжения при отключении реле. Его длительность очень мала, но напряжение огромно – около 700 В, при 12 В питания обмотки реле.

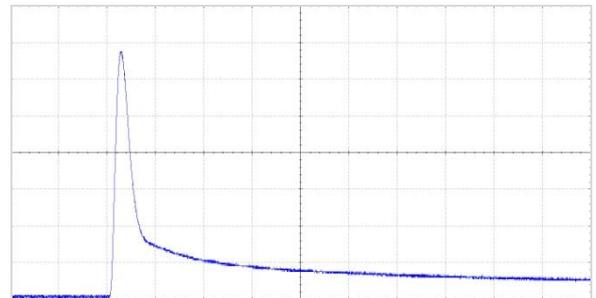


Рис. 31. Бросок напряжения на стоке транзистора без защитного диода, без ограничителя напряжения, точка 3, 100 В/кл., 25 мкс/кл

На Рис. 31 можно увидеть высоковольтный импульс в увеличенном масштабе. Его длительность составляет примерно 15-20 мкс.

Исходя из полученных результатов, схема с отсутствием защитного диода рекомендуется в условиях, когда требуется быстро отключать реле. При этом необходимо использовать транзистор, который способен выдержать высоковольтный импульс, образующийся в цепи при отключении реле.

#### 4.3. Подключение с использованием ограничителя напряжения

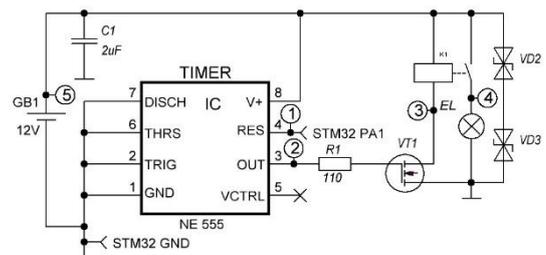


Рис. 32. Схема управления реле с ограничителем напряжения

Также для ограничения выброса напряжения, возникающего при выключении реле, можно использовать полупроводниковый ограничитель напряжения (ОН) [18]. В технической литературе можно встретить названия: TVS-диод (*Transient Voltage Suppressor*), защитный диод, ограничительный стабилитрон, трансил, ограничитель напряжения, ограничительный диод, супрессор. Рассмотрим для примера ОН *SMBJ24CA* [19].

При напряжении 26-28 В ОН начинает приоткрываться и «забирать на себя» лишнюю энергию, при этом протекающий через него ток будет около 1 мА. При напряжении около 50 В ОН уже способен пропустить через себя импульс тока 80 А.

Большим минусом данных ОН можно считать большую зависимость максимальной импульсной мощности от длительности импульса перенапряжения.

При проведении экспериментов было принято решение ограничить выброс напряжения на уровне равном примерно 100 В. Для этого были последовательно соединены имеющиеся в наличии два ОН *SMBJ24CA*. При таком включении напряжение ограничения суммируется.

Представленные ниже графики (Рис. 33-35) отражают процессы, протекающие в схеме, показанной на Рис. 32.

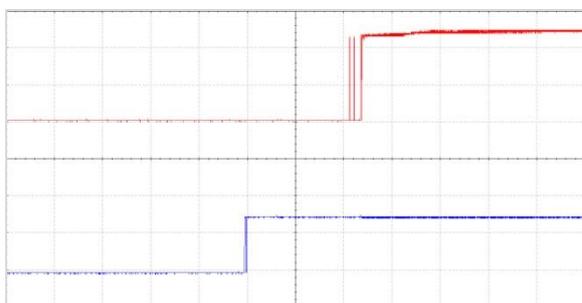


Рис. 33. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал, точка 1, 2 В/кл.), без защитного диода с ограничителем напряжения, 2,5 мс/кл

На Рис. 33 отображена задержка между управляющим сигналом от МК и включением лампы. Задержка включения составляет  $\approx 5.5$  мс.

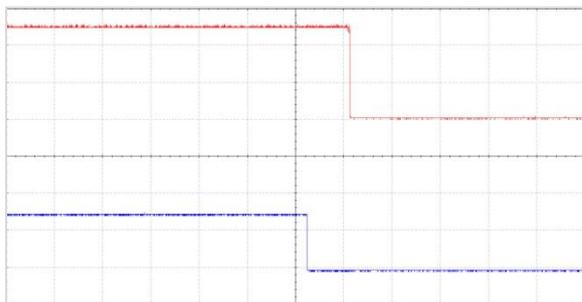


Рис. 34. Напряжение на лампе (верхний сигнал, точка 4, 5 В/кл.), сигнал с вывода 4 NE555 (нижний сигнал,

точка 1, 2 В/кл.), без защитного диода, с ограничителем напряжения, 2,5 мс/кл

На Рис. 34 отображена задержка выключения лампы. При прекращении подачи напряжения на обмотку реле лампа продолжает гореть еще на протяжении примерно 2.5 мс. В сравнении со схемой, в которой используется защитный диод, размыкание контактной группы реле происходит быстрее в  $\sim 4$  раза.

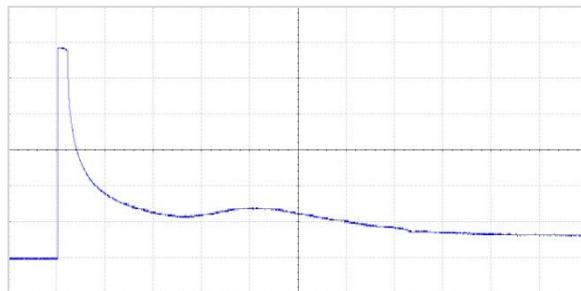


Рис. 35. Бросок напряжения на стоке транзистора без защитного диода, с ограничителем напряжения, точка 3, 20 В/кл., 500 мкс/кл.

На Рис. 35 изображён выброс напряжения, возникающий на стоке транзистора VT1 при отключении реле, «срезанный» ограничителями напряжения. Максимальное напряжение составляет примерно 120 В, имеется чётко видимое ограничение импульса.

Исходя из полученных графиков, можно сделать вывод об эффективности использования ограничителей напряжения для защиты транзистора, а также отметить, что размыкание контактной группы реле происходит быстрее, чем при использовании схемы с защитным диодом. При использовании такой схемы необходимо использовать транзистор, способный выдержать напряжение, например, в 1,5 раза превышающее уровень, на котором происходит ограничение выброса напряжения.

## ВЫВОДЫ

При выборе реле стоит с осторожностью относиться к указанным на маркировке реле характеристикам, так как в них обычно указываются предельно допустимые значения, работа при которых необязательно будет продолжительной. Необходимо детальное рассмотрение документации, а в случае отсутствия подробных характеристик стоит задуматься о качестве такого реле.

Относительно схем включения реле можно отметить следующее:

1. Схема с использованием защитного диода проста в реализации и обеспечивает достаточную защиту управляющих элементов схемы от выбросов напряжения при выключении реле.

2. Схема без использования защитного диода и других защитных элементов имеет максимальное быстродействие при отключении реле, но требует тщательных расчётов броска

напряжения и подбора транзистора, способного выдержать высокое напряжение. Ввиду дороговизны высоковольтных транзисторов такая схема рекомендуется к использованию только в тех случаях, когда требуется максимально высокая скорость отключения.

3. Схема с использованием ограничителей напряжения является оптимальной, так как обеспечивает высокую скорость отключения реле и не требует наличия в схеме дорогих высоковольтных транзисторов, но при этом требуется подобрать ограничитель напряжения под условия работы схемы.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Wikipedia – Переменный ток. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D1%82%D0%BE%D0%BA](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA)
- [2] Wikipedia – Коэффициент мощности. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82\\_%D0%BC%D0%BE%D1%89%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%BC%D0%BE%D1%89%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8)
- [3] ГОСТ Р 50030.
- [4] Wikipedia – Электромагнитное реле. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5\\_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5)
- [5] Документация на реле SONGLE серии SRD. URL: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/SRD-05VDC-SL-C-Datasheet-Songle-720556>
- [6] Документация на реле OMRON серии G2RL. URL: [https://omronfs.omron.com/en\\_US/ecb/products/pdf/en-g2rl.pdf](https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/products/pdf/en-g2rl.pdf)
- [7] Мощные электромагнитные реле. Справочник инженера. – 2001, СПб. 152с.
- [8] Документация на реле OMRON серии G5V-2. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/724502.pdf>
- [9] Документация на контакторы ИЭК серии КМИ. URL: <https://www.iiek.ru/products/catalog/detail.php?ID=9148>
- [10] Wikipedia – Твердотельное реле. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5\\_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5)
- [11] Каталог ТТР производства ЗАО «Протон-импульс». URL: <http://proton-impuls.ru/categoryrele/tverdotelnye-rele/>
- [12] Документация на таймер NE555x: URL: <https://static.chipdip.ru/lib/222/DOC000222900.pdf>
- [13] Управление низковольтной мощной нагрузкой от микроконтроллера с использованием микросхемы 555. Автоматика и программная инженерия. 2017. №2. С. 103–107. URL: <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%B8%D0%9F%D0%98-2-2017-11.pdf>
- [14] Документация на транзисторы ST серии STP35NF10: URL: [https://www.datasheetpdf.com/pdf-down/S/T/B/STB35NF10\\_STMicroelectronics.pdf](https://www.datasheetpdf.com/pdf-down/S/T/B/STB35NF10_STMicroelectronics.pdf)
- [15] Документация на реле SCHRACK серии RT1. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/145/DOC000145160.pdf>
- [16] Документация на диоды серии 1N400x: URL: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds28002.pdf>
- [17] Документация на транзисторы ST серии STP10NK80ZFP. URL: [http://pdf5.datasheet.su/amp-1-1415899-6\\_25708b8f2e.pdf](http://pdf5.datasheet.su/amp-1-1415899-6_25708b8f2e.pdf)
- [18] Go radio – Супрессор. URL: <http://go-radio.ru/suppressor.html>
- [19] Документация на защитные диоды ST серии SMBJ. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/476/DOC001476144.pdf>



**Виталий Геннадьевич Трубин** – старший преподаватель кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».

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

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



**Александр Игоревич Незванов** – студент 1 курса магистратуры кафедры Автоматики НГТУ.

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

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



**Максим Витальевич Трубин** – студент 1 курса магистратуры кафедры Автоматики НГТУ.

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

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

Статья получена 02.01.2019 г.

## Choice and Connection Recommendations of Electromagnetic Relay for Switching Household Loadings

A.I. Nezvanov, V.G. Trubin, M.V. Trubin

*Abstract:* This material addresses the problem that arises when electronic device developer needs to switch direct and alternating current chains. It is a problem with choice of electromagnetic relay. These devices have many parameters and only the experienced developer can understand all of them. Wrong choice of relay can break work of the device. In the course of work main characteristics of alternating current, electromagnetic relays and different schemes of connections will be considered..

*Key words:* electromagnetic relay, alternating current, switching, loads control by microcontroller, voltage limiter, current throw, cold start-up of a lamp, voltage throw.

## REFERENCES

- [1] Wikipedia – Alternating current. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D1%82%D0%BE%D0%BA](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA)
- [2] Wikipedia – Power factor. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82\\_%D0%BC%D0%BE%D1%89%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%8D%D1%84%D1%84%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%B5%D0%BD%D1%82_%D0%BC%D0%BE%D1%89%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B8)
- [3] Russian State Standard GOST R 50030.
- [4] Wikipedia – Electromagnetic relay. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5\\_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5)
- [5] Documentation for SONGLE SRD Series Relays. URL: <http://www.datasheet-pdf.com/PDF/SRD-05VDC-SL-C-Datasheet-Songle-720556>
- [6] Documentation on the OMRON G2RL series relay. URL: [https://omronfs.omron.com/en\\_US/ecb/product/pdf/en-g2rl.pdf](https://omronfs.omron.com/en_US/ecb/product/pdf/en-g2rl.pdf)
- [7] Powerful electromagnetic relays. Engineer's Handbook. - 2001, St. Petersburg. 152 s.
- [8] OMRON G5V-2 Relay Documentation. URL: <https://www.farnell.com/datasheets/724502.pdf>
- [9] Documentation for IEC contactors KMI series. URL: <https://www.iek.ru/products/catalog/detail.php?ID=9148>
- [10] Wikipedia – Solid-state relays. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5\\_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B2%D0%B5%D1%80%D0%B4%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%B5)
- [11] Catalog TTR produced by JSC "Proton-impulse". URL: <http://proton-impuls.ru/categoryrele/tverdotelnye-rele/>
- [12] Timer NE555x Documentation: URL: <https://static.chipdip.ru/lib/222/DOC000222900.pdf>
- [13] Control of low-voltage powerful load from the microcontroller using 555 chip. Automatics & Software Engineering. 2017. №2. P. 103–107. URL: <http://www.jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%B8%D0%9F%D0%98-2-2017-11.pdf>
- [14] ST transistor STP35NF10 documentation: URL: [https://www.datasheetpdf.com/pdf-down/S/T/B/STB35NF10\\_STMicroelectronics.pdf](https://www.datasheetpdf.com/pdf-down/S/T/B/STB35NF10_STMicroelectronics.pdf)
- [15] SCHRACK RT1 Relay Documentation. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/145/DOC000145160.pdf>
- [16] Documentation for 1N400x series diodes: URL: <https://www.diodes.com/assets/Datasheets/ds28002.pdf>
- [17] ST Transistor Documentation of the Series STP10NK80ZFP. URL: [http://pdf5.datasheet.su/amp-1-1415899-6\\_25708b8f2e.pdf](http://pdf5.datasheet.su/amp-1-1415899-6_25708b8f2e.pdf)
- [18] Go radio – Suppressor. URL: <http://go-radio.ru/supressor.html>
- [19] Documentation for protective diodes ST series SMBJ. URL: <https://static.chipdip.ru/lib/476/DOC001476144.pdf>



**Vitaly Trubin** - Senior Lecturer, Department of Automatics, NSTU, Director of KB Automatics LLC.

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

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



**Alexander Nezvanov** - a student of the 1st year of the master's program at the Automation Department of the

NSTUE-mail: [nezvanovml@mail.ru](mailto:nezvanovml@mail.ru)

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

**Maxim Trubin** - 1st year master's student at the Automation Department of the NSTU.

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

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



The paper was received on 02.01.2019 r.

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

### **Содержание раздела:**

- ◇ В.А. Жмудь, А.Ю. Ивойлов, Л.Д. Димитров, В.Г. Трубин, Я. Носек, Г. Рот. Преимущества и проблемы разработки беспилотных одноколесных балансирующих роботов. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия, Технический университет Софии, София, Болгария, Технический университет, Либерец, Чехия, Университет Зигена, Зиген, Германия. Автоматика и программная инженерия. 2019. №1 (27). С. 34–46.

# Преимущества и проблемы разработки беспилотных одноколесных балансирующих роботов

В.А. Жмудь<sup>1</sup>, А.Ю. Ивойлов<sup>1</sup>, И.Л. Рева<sup>1</sup>, Л.Д. Димитров<sup>2</sup>, В.Г. Трубин<sup>1</sup>, Я. Носек<sup>3</sup>, Г. Рот<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Технический университет Софии, София, Болгария

<sup>3</sup> Технический университет, Либерец, Чехия

<sup>4</sup> Университет Зигена, Зиген, Германия

*Аннотация:* В настоящей статье обсуждается направление развития одноколесных балансирующих роботов в самое ближайшее время. Российские производители явно отстают от мирового уровня, однако, количество выставок и конференций по этой тематике стремительно нарастает. При ближайшем рассмотрении, к сожалению, эти мероприятия лишь подтверждают отставание отечественных технологий, под маркой робототехнических устройств демонстрируются помимо прочего и механические транспортные средства с дитанционным управлением, не имеющие никаких датчиков, или имеющие лишь видеокамеры, информация от которых не служит для принятия решения об управлении этими устройствами непосредственно компьютерным интеллектом в этих устройствах, минуя человека. Разумеется, такие устройства не являются роботами, хотя и составляют арсенал средств робототехники. В настоящих роботах компьютерный интеллект должен самостоятельно участвовать в управлении механическим движением, причем этот интеллект не обязательно должен полностью располагаться непосредственно в этих устройствах. В статье дана мотивировка наиболее эффективного направления развития балансирующих роботов, а именно: сочетание балансирования с отсутствием пилота и с движением по заданной программе с целью выполнения заданных функций.

*Ключевые слова:* балансирующий робот, робототехника, сигвей, автоматика, стабилизация, управление

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время происходит интенсивная разработка различных вариантов балансирующих роботов, одноколесных и двухколесных. Среди двухколесных роботов можно выделить два класса: а) с колесами на единой оси, расположенной ортогонально направлению движений (как на сигвее); б) с колесами, расположенными по направлению движения (как на велосипеде и мотоцикле). Оба эти варианта являются структурно неустойчивыми системами. Такие конструкции без использования эффективной системы поддержания равновесия принципиально неустойчивы, в обесточенном состоянии они опрокидываются. В случае «а» равновесие может быть обеспечено системой с отрицательной обратной связью, изменяющей скорость вращения колес таким образом, чтобы центр масс системы всегда находился строго над осью колес, или, если это не достигается в точности, балансировал бы около этого равновесного состояния с небольшими отклонениями от него, которые должны подавляться системой с обратной связью.

Если система типа «а» работает устойчиво, такой балансирующий робот может находиться в покое, когда центр его массы находится выше оси вращения колес, так как он находится строго над осью, условие равновесия сил не нарушается. Нарушение равновесия вне

зависимости от причин вызывает действие обратной связи, которая обеспечивает восстановление равновесия путем вращения колес в соответствующем направлении. Если причина, вызывающая нарушение равновесия, не прекращает своего действия, то колеса не прекращают вращения, достигается динамическое равновесие, то есть равновесие в движении, в динамике. При этом балансирующий робот приходит в движение по направлению отклонения центра масс от равновесного положения, причем, чем больше это отклонение, тем быстрее будет движение, которое может вернуть равновесие.

В пилотируемом балансирующем роботе типа «а» воздействие, нарушающее равновесие, формирует пилот. Поэтому он может управлять направлением и скоростью движения. Для поворота вводятся отдельные воздействия на скорость вращения колес.

Балансирующий робот рассмотренного типа при отсутствии пилота остается приблизительно в одном и том же месте. Для того чтобы заставить такого робота двигаться вперед или назад, требуется дополнительная механическая система, нарушающая равновесие в требуемом направлении и на требуемую величину отклонения под действием электронных управляющих сигналов, которые формируются, исходя из задачи движения. Эта сила может быть заменена программно формируемой величиной задания на скорость, которая

формируется в виде небольшой добавки к сигналу, определяющему отклонение балансирующего робота от состояния равновесия.

Таким образом, чтобы беспилотный балансирующий робот типа «а» двигался в нужном направлении с нужной скоростью, требуется либо дополнительная электромеханическая система, управляемая компьютерным интеллектом, либо дополнительная команда в программу управления. При этом задание на движение (макропрограмма) может передаваться по беспроводной системе связи или автономно формироваться под действием заложенной программы.

О системах типа «б» в литературе сообщений значительно меньше. Пилотируемые двухколесные системы известны давно как мотоциклы, велосипеды, мотороллеры, самокаты и так далее. В этом случае человек поддерживает равновесие в направлении, ортогональном к направлению движения. Равновесие может быть обеспечено тремя способами: 1) за счет отклонения центра масс пилота, компенсирующего отклонения центра масс транспортного средства; 2) за счет изменения поворота первого колеса и, соответственно, вовлечения транспортного средства в вираж, то есть поворот на скорости; 3) сочетанием обоих способов. В первом случае система может и должна продолжать двигаться прямо даже при возникновении наклонов дороги и локальных неровностей. Во втором случае транспортное средство должно совершать поворот для восстановления равновесия. Оба эти «чистые» случая непригодны для полноценного управления транспортным средством, поскольку здесь направление движения является зависимым от условий равновесия. Пилот использует сочетание этих способов поддержания равновесия на уровне интуиции. Беспилотное транспортное средство также должно сочетать оба этих способа, следовательно, для управления двухколесным балансирующим беспилотным роботом требуется обеспечение двух механических воздействий: 1) поворот рулевого колеса (им не обязательно должно быть переднее колесо, может использоваться поворот заднего колеса или поворот обоих колес); 2) перемещение центра масс влево или вправо по отношению к направлению движения.

Разработка одноколесного балансирующего робота в варианте с имеющимся пилотом на практике уже решено, но управление таким транспортным средством требует наличия пилота с определенными навыками езды на нем.

В беспилотном одноколесном варианте все действия, которые совершает пилот, должны быть заменены электромеханической системой, которая, во-первых, обеспечивает нарушение

равновесия для того, чтобы задать направление и скорость движения через систему, которая это равновесие сохраняет за счет вращения колеса, во-вторых, обеспечивает поддержание равновесия в направлении оси этого единственного колеса, в-третьих, формирует необходимые воздействия для поворота.

## **1. ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ДВУХКОЛЕСНЫХ И ОДНОКОЛЕСНЫХ БАЛАНСИРУЮЩИХ БЕСПИЛОТНЫХ РОБОТОВ**

Дальнейшие исследования в этой области должны быть направлены на разработку и уточнение научных принципов проектирования высокоточных высокоскоростных робототехнических систем. Результатом таких исследований должны быть научно обоснованные методики проектирования таких систем на примере двухколесных и одноколесных беспилотных балансирующих роботов. Ключевой особенностью таких роботов должно стать устойчивое движение в беспилотном исполнении по заданной траектории по пересеченной местности, включая наклон местности как в направлении движения, так и в направлении, ортогональном направлению движения. Устойчивость достигается дополнительными средствами балансировки, основанными на встроенных высокоскоростных маховиках пониженной массы.

Направление исследования должно включать теоретические исследования, практическую реализацию программно-аппаратных роботов, экспериментальное исследование и модификации полученных действующих устройств.

## **2. АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ**

Актуальность исследований является следствием, во-первых, необходимости выполнения этих исследований как можно быстрее, во-вторых, возникшей возможностью их выполнения именно сейчас. Необходимость исследований вытекает из нарастающего отставания отечественной техники в области мобильных балансирующих роботов, как пилотируемых, так и беспилотных. Указанные устройства обладают многими преимуществами, они могут применяться для доставки срочных малогабаритных грузов в самые труднодоступные точки, в особенности это относится к одноколесным балансирующим роботам, поскольку они не требуют широкой дороги и могут эффективно работать даже при значительном наклоне в направлении, перпендикулярном направлению движения. Наиболее известные зарубежные фирмы демонстрируют множество подобных устройств, однако на рынок они еще не поступили, все подобные устройства являются уникальными

опытными образцами, результатом работы больших научных коллективов, оснащенных самой современной техникой и имеющих достаточные ресурсы на эти исследования.

Конкурировать с подобными коллективами в области изготовления крупногабаритных и достаточно мощных образцов невозможно. Однако малогабаритные образцы, от которых на данном этапе не требуется длительного ресурса работы батарей, большой мощности, герметичности и прочих важных характеристик, которые все же достигаются достаточно просто с помощью грамотных конструкторских решений, отечественные коллективы вполне могут составить ощутимую конкуренцию.

В сотрудничестве с зарубежными партнерами по линии университетов, перед которыми стоят сходные задачи, и у которого доля решенных подзадач приблизительно соизмерима, но она не тождественна, а дополняет долю решенных задач в отечественном коллективе, такая постановка задачи более чем оправдана, что позволяет с уверенностью ожидать успеха.

Малогабаритные образцы представляют большую проблему с позиции эффективного управления, поскольку их быстродействие в несколько раз выше, следовательно, и управление должно быть в несколько раз более быстрым.

Эти проблемы успешно решены в цикле работ, в этой области имеются как результаты интеллектуальной деятельности (патенты, зарегистрированные программные продукты) [1–18], так и научные публикации [19–32]. Развитие методов проектирования регуляторов в этих работах достигло такого уровня, что становится относительно трудно отыскать задачу, которую было бы сложно решить методом численной оптимизации. Полигоном для исследования и улучшения методов синтеза регуляторов может стать сложное электромеханическое устройство, управление которым представляет собой известную трудность. К таким устройствам можно отнести балансирующий одноколесный беспилотный робот. Это устройство принципиально отличается от пилотируемого одноколесного робота – задачи, которая уже достаточно широко известна а изделия такого вида выпускаются серийно. В отличие от пилотируемого балансирующего робота (БПР), беспилотный балансирующий робот (ББР) не имеет человека, который мог бы поддерживать равновесие в направлении, ортогональном направлению движения. По аналогии можно сравнить циркового акробата, поддерживающего равновесие на одноколесном велосипеде – в таком устройстве вообще нет системы автоматического поддержания равновесия, и все же оно может оставаться в равновесии за счет искусства пилота. В ББР

человеческий фактор устраняется целиком. Кроме того, подобная система может быть различным образом нагружена как неживым грузом (например, гирей), так и живым грузом (например, клеткой с животным), или его аналогом (механическим маховиком со смещенным центром тяжести), что позволит испытать систему наиболее эффективно, объективно и всесторонне.

Задача управления двухколесным балансирующим роботом решена в цикле работ [33–35].

Задачей дальнейших исследований стоит создание одноколесного беспилотного балансирующего робота и обеспечение его эффективного действия в условиях переменной нагрузки, сформированной механическим маховиком со смещенным центром тяжести. Решение данной задачи принципиально важно для развития теории автоматического управления как создание полигона для апробации наиболее современных и эффективных методов проектирования регуляторов для нелинейных нестационарных объектов (нестационарные свойства порождаются изменением массы груза, которая входит в математическую модель объекта). Мешающим воздействием (помехой) является движение маховика по случайному закону, не известному системе автоматической стабилизации. Результаты будут иметь фундаментальное значение для инженерных наук, они могут быть применены в транспортных системах, а также внедрены в учебный процесс.

Основанием для международного сотрудничества является наиболее развитая экспериментальная база европейских университетов и наиболее развитая теоретическая база российских университетов.

Партнерство уже сейчас дало результаты в виде создания балансирующих двухколесных беспилотных роботов малых размеров, что повышает требования к их быстродействию и точности управления [36–58]. В этих устройствах применены тахометрические датчики, гироскопы и датчики ускорения, для пространственной ориентации использовались ультразвуковые датчики и оптические датчики (видеокамеры). Все разработанные ББР используются в учебном процессе для подготовки специалистов по направлению «Автоматика и мехатроника» по курсу «Робототехника».

Болгарские партнеры имеют существенные публикации в области предполагаемого сотрудничества [59–75]. Этот научный задел дает основания для уверенности в скором успехе исследований в указанной области.

### 3. УРОВЕНЬ ТЕХНИКИ

Анализ современного состояния исследований в данной области дает следующие результаты [76–87]. Имеется достаточное количество сообщений о подобных разработках. Как правило, демонстрируются устройства, которые только сохраняют равновесие, как, например, видео по ссылке [88]. При этом равновесие в направлении движения сохраняется за счет вращения ведущих колес, равновесие в ортогональном направлении обеспечивается маховиком, движение по заданной траектории не рассматривается и не обсуждается.

Предлагаемое направление новых исследований обладает принципиальным отличием, которое состоит в том, что будет обеспечено движение по заданной траектории за счет дополнительных маховиков, создающих дисбаланс, что будет вызывать движение вперед или назад. Также будет решена задача поворота и разворота.

### 4. ЦЕЛИ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Целью дальнейших исследований может стать создание действующих образцов балансирующих беспилотных колесных роботов, включая одноколесные, с целью отработки технологии управления ими для выполнения комплексных задач. Разработка принципов построения таких систем и их верификация путем практических испытаний. Далее эти результаты следует использовать для выполнения ОКР.

Такие исследования могут быть разбиты, например, на следующие задачи:

1. Развитие принципов и методов идентификации сложных объектов и управления ими.

2. Развитие методов цифрового управления в реальном времени и разработка соответствующего программного обеспечения.

3. Разработка лаконичных эффективных конструкций беспилотных балансирующих роботов.

4. Апробация и модификация разработанных методов и принципов и опубликование результатов в высокорейтинговых периодических научных изданиях.

5. Внедрение результатов учебный процесс российских и болгарских университетов.

6. Создание научного задела для дальнейших исследований в области робототехники.

Научная новизна такого подхода заключается в комплексном подходе.

Во-первых, задача не ограничивается простым сохранением равновесия, а распространяется на область движения беспилотного транспортного средства под

действием электромеханических устройств, формирующих требуемый для управления момент. Во-вторых, одновременно параллельно для большей эффективности и для лучшей управляемости предлагается использовать несколько средств достижения равновесия по каждой координате, т.е. предполагается использование маятника не только по ортогональному направлению, но в направлении движения, что не исключает и иных средств обеспечения равновесия. В-третьих, предполагается использование нескольких видов датчиков, по меньшей мере, гироскопических датчиков, тахометрических датчиков, датчиков ускорения. В-четвертых, в отличие от известных балансирующих роботов, предполагается использование робототехнического принципа управления движением на основе информации о пересекаемой местности, что включает использование видеокамер с системой распознавания препятствий (технического зрения) и ультразвуковых датчиков для дополнительного подтверждения природы обнаруженных препятствий по направлению движения. Предполагается также осуществить исследования по целесообразности использования сферического колеса.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе реализации проекта будут использованы методы теоретического исследования, литературного поиска, методы численного моделирования и оптимизации сложных мехатронных объектов, методы практической реализации, тестовые и доводочные испытания, разработка и модификация программных средств.

Ожидается, что будут созданы действующие образцы балансирующих беспилотных колесных роботов, включая одноколесные. Будет разработана и отлажена технология управления ими для выполнения комплексных задач. Будут разработаны принципы построения таких систем и выполнена их верификация путем практических испытаний.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2540461. Заявка № 2013145173, приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 19 декабря 2014 г. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюл. № 4.
- [2] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2541684. Заявка № 2013146115, приоритет от 15.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 15 января 2015 г. Срок действия патента истекает 25.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюл. № 5.

- [3] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2566339. Приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 20 октября 2015 г. Бюл. № 29. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36.
- [4] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2584925. Приоритет от 05.03.15. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.04.16. Бюл. № 14. Срок действия патента истекает 05.03.35. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [5] В.А. Жмудь, Заворин А. Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент на изобретение № 2554291. Приоритет от 01.04.14. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.06.15. Бюллетень № 18. Срок действия патента истекает 01.04.34. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [6] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «EdpCtrlServer\_v004.py» № 2014612791, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». Авторы: Печников А.Л., Трубин В.Г., Жмудь В.А. Заявка № 2013660275, дата поступления 11 ноября 2013 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014 г.
- [7] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «EdpCtrlClient\_v004.py» № 2014612792, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». Авторы: Печников А.Л., Трубин В.Г., Жмудь В.А. Заявка № 2013660287, дата поступления 11 ноября 2013 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014 г.
- [8] Свидетельство на регистрацию программы для ЭВМ № 2013618271 HC-SR04\_Ultrasonic\_Driver-v002. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. Заявка № 2013616195. Дата поступления 18 июля 2013. Дата гос. регистрации в реестре программ для ЭВМ 04 сентября 2013 г.
- [9] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013615343 NXT\_MotorDriver-v003a. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: В.А. Жмудь, А.В. Ескин. Заявка № 2013616195. Дата поступления 26 апреля 2013. Дата гос. регистрации в реестре программ для ЭВМ 05 июня 2013 г.
- [10] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013617769 Bluetooth\_HC-05\_Driver-v001. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Ескин А.В., Жмудь В.А. Заявка № 2013615378 от 13 февраля 2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 22 августа 2013 г.
- [11] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2012618604 DamMonitorNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2012616410 от 27 июля 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2012 г.
- [12] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611161 ZipDataFlowNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660916 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [13] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611162 DefProcNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660917 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [14] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611164 FlashReadNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660919 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [15] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013613341 ZScannerNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2013611238 от 13 февраля 2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2013 г.
- [16] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015662198. FORS-DC-Motor-Driver-NSTU. ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Жмудь В. А, Трубин В. Г. Заявка от 30.09.15. Опубликовано 18.11.15.
- [17] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015617101. MPU6050\_Alfa-beta\_filter. ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Жмудь В. А, Ивойлов А. Ю, Трубин В. Г, Федоров Д. С. Заявка от 18.05.15 Опубликовано 30.06.15
- [18] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2015614444. ADXL335\_Accelerimeter\_Driver. ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Жмудь В. А, Ивойлов А. Ю, Трубин В. Г, Федоров Д. С. Заявка от 29.12.14. Опубликовано 17.04.15
- [19] V. A. Zhmud, A. V. Liapidevskiy. 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.
- [20] V. A. Zhmud, V. M. Semibalamut, A. S. Vostrikov. 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.
- [21] Zhmud, V., Zavorin, A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. 2015. Proceedings of the “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015” 10.1109/SIBCON.2015.7147060.

- [22] Zhmud, V., Pyakillya, B., Semibalamut, V., Trubin, M., Yadrishnikov, O. The two methods of reverse overshoot suppression in automation systems. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. 2017. 9(2-2), p. 153–157.
- [23] Zhmud, V., Pyakillya, B. Identification and control of object with time-delay link. *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*. 2017. 9(2-2), p. 109–113.
- [24] V. Zhmud, A. Liapidevskii, Boris Pyakillya. Numerical Optimization of PID-Regulator for Object with Distributed Parameters. *Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering*. ISSN: 2180-1843. 2017. Vol. 9 No. 2-3. P. 9–114.
- [25] F. Ullmann, W. Hardt, V. A. Zhmud. Machine learning algorithms for impact localization on formed piezo metal composites. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 589–593.*
- [26] V.A. Zhmud, D. B. Imekov, K. Yu. Lastochkin and A. V. Lukicheva. New Structure of Regulator for Controlling of Object with Oscillation Features and its Modelling Testing. *Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i-2014)*. Kos Island, Greece, 4–6 June 2014.
- [27] Liapidevskiy, A.V., Petrov, A.S., Zhmud, V.A., Sherubneva, I.G. Shortcomings of existing systems for registration and legal protection of software products and possible ways to overcome them. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. 1015(4), 042066.
- [28] Zhmud, V., Hardt, W. Practical dependance of the error of ADC on conversion frequency: Researches with mathematical modeling. *11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings*. 2017-November, p. 1–8.
- [29] Zhmud, V.A., Goncharenko, A.M. Modern ways of high-precision frequency measurements. 2016. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 – Proceedings*. 2016. 1,7802283, p. 309–313.
- [30] Zhmud, V., Semibalamut, V., Vostrikov, A. Design of robust energy-saving regulators by means of optimization software. *Testing and Measurement: Techniques and Applications*. 2015. *Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015*. p. 419–424.
- [31] Using the Numerical Optimization Method for Tuning the Regulator Coefficients of the Two-Wheeled Balancing Robot. Andrei Yu. Ivoilov, Vadim A. Zhmud, Vitaly G. Trubin, Hubert Roth. 2018. *14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894*. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P. 228–236.
- [32] Zhmud, V. New Modeling Tested Method for Controlling of Object with Oscillation Features. *Pros. Of. International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014): Phuket, Thailand.: Jan. 11-12, 2014. P. 289–296.*
- [33] G. V. Sablina, I. V. Stazhilov, V. A. Zhmud. Development of rotating pendulum stabilization algorithm and research of system properties with the controller. *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. 1, ч. 3. С. 165–170.*
- [34] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Trubin, V.G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings*. 2018. 2018-March, p. 1–9.
- [35] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Roth, H. The dynamic accuracy increasing for a controlling system by means of the modified algorithm of numerical optimization of the regulator. *Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings*. 2018. 2018-March, p. 1–7.
- [36] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, O.D. Yadrishnikov. 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*.
- [37] Zhmud V.A. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters / Zhmud V.A., Reva I.L., Dimitrov L.V. *Journal of Physics: Conf. Series*. 2017. V.803. 012185.
- [38] V. Zhmud, L. Dimitrov. Designing of complete multi-channel PD-regulators by numerical optimization with simulation. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. Art. 129 (6 p.)*.
- [39] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov. The influence of the type of the test signal on the result of numerical optimization of regulators. *Journal of Physics: Conference Series*. - 2017. - Vol. 803. - Art. 012186 (6 p.).
- [40] V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov The Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 6 p. ISBN 2380-6516.*
- [41] Zhmud, V., Dimitrov, L., Adaptive systems based on competitive quality criteria. *Proc. of “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015”*. 2015. 7147058. 2-s2.0-84941075474.
- [42] Zhmud, V.A., Frantsuzova, G.A., Dimitrov, L.V., Nosek, J. Experience of international collaboration in preparation of masters in "Mechatronics" with call for funds from Tempus and Erasmus programs. *Journal of Physics: Conference Series*. - 1015 (2018) 032190 - ISBN 1742-6588. - DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032190.
- [43] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. B. Taichenachev. Model study of automatic and automated control of hysteretic object. *International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S.*

- Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 655–659.
- [44] A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. 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.
- [45] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. Yu. Ivoylov. Additional Simplification of the Precision Frequency Synthesizer. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P.301 – 306.
- [46] Providing of Smooth Switching of Sine Signals for Precision Frequency Synthesizer. Vadim A. Zhmud, Lubomir V. Dimitrov, Andrey Yu. Ivoylov. P. 307 – 311.
- [47] Control of Object in the Loop with Feedback Using Imperfect Sensors of Position and Acceleration. Vadim A. Zhmud, Lubomir V. Dimitrov, Vitaly Trubin, Hubert Roth. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P. 312 – 318.
- [48] Zhmud, V.A., Hardt, W., Dimitrov, L.V., Roth, H. Complex issues in regulator designing. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501669.
- [49] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling a second-order multichannel object of dimension  $3 \times 2$  with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501742.
- [50] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling of second-order two-channel object with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501793.
- [51] Zhmud, V.A., Kondratiev, N.O., Kuznetsov, K.A., Trubin, V.G., Dimitrov, L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1015(3), 032189.
- [52] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. V. Taichenachev. The use of sigma-delta-ADC in the commutation mode. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 640–643.
- [53] Zhmud, V. A.; Dimitrov, L. V.; Roth, H. A New Approach to Numerical Optimization of a Controller for Feedback System. Proc. of 2nd International Conference on Applied Mechanics, Electronics and Mechatronics Engineering (AMEME) Местоположение: Beijing, Peoples Resp. China. Oct. 22-23, 2017.: DEStech Transactions on Engineering and Technology Research P.: 213–219.
- [54] Zhmud, V., Dimitrov, L., Semibalamut, V., Taichenachev, A. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 2017. 7998568.
- [55] Zhmud, V.A., Semibalamut, V.M., Dimitrov, L.V. Investigation of compensation and other methods for controlling of oscillating objects. Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. 2017. 7884174, p. 538–543.
- [56] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Hardt, W. Automatic identification of controlled objects. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–8.
- [57] Smart Phase Locking of the Frequency of Two Identical Lasers to Each Other. Vadim A. Zhmud, Aleksey V. Taichenachev, Lubomir V. Dimitrov, Vladimir M. Semibalamut. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P.319–326.
- [58] Zhmud, V., Dimitrov, L. Investigation of the causes of noise in the result of multiple digital derivations of signals: Researches with mathematical modeling. 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings. 2017-November, p. 1–9.
- [59] Petrov, P., Georgieva, V. Geometric path planning and tracking control with bounded steering angle for the parking problem of automatic vehicles. 2018. AIP Conference Proceedings 2048,060017
- [60] Petrov, P., Georgieva, V. Adaptive velocity control for a differential drive mobile robot. 2018. 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447091
- [61] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-based position regulation of differential-drive mobile robots. 2018. 2018 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447066
- [62] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-Based Line Tracking Control for Nonholonomic Differential-Drive Mobile Robots. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439461.
- [63] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Ultrasound Image Processing for Improving Diagnose of Renal Diseases. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439641.
- [64] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Visual Marker Recognition with Application to Mobile Robot Localization. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439217.
- [65] Petrov, P. Dynamics and adaptive motion control of a two-wheeled inverted pendulum robot. 2018. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences. 71(7), p. 945-954.
- [66] Georgieva, V., Petrov, P., Nagy, S., Sziova, B. Detecting contours of pathological forms in colonoscopy images using a hybrid method. 2018. Communication, Electromagnetics and Medical Application. 2018-October, pp. 27-30.
- [67] Georgieva, V.M., Mihaylova, A.D., Petrov, P.P. An application of dental X-ray image enhancement. 2017. 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2017 – Proceeding. 2017-October, p. 447-450.
- [68] Petrov, P., Dimitrov, L., Aleksandrov, D. Longitudinal adaptive control of mobile robots in a platoon. 2016. ACM International Conference Proceeding Series. p. 21-25.

- [69] Petrov, P., Nashashibi, F. Automatic vehicle perpendicular parking design using saturated control. 2015. 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, AEECT 2015. 7360566.
- [70] Petrov, P., Nashashibi, F. Saturated feedback control for an automated parallel parking assist system. 2014. 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics and Vision, ICARCV 2014. 7064368, pp. 577-582.
- [71] Petrov, P., Nashashibi, F. Modeling and nonlinear adaptive control for autonomous vehicle overtaking. 2014. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 15(4),6754174, p. 1643-1656.
- [72] Petrov, P., Nashashibi, F. Adaptive steering control for autonomous lane change maneuver. 2013. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. 6629570, p. 835-840.
- [73] Panev, S., Petrov, P., Boumbarov, O., Tonchev, K. Human gaze tracking in 3D space with an active multi-camera system. 2013. Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS 2013. 1,6662719, p. 419-424.
- [74] Janosevic, D., Mitrev, R., Andjelkovic, B., Petrov, P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. 2012. Journal of Zhejiang University: Science A. 13(12), p. 926-942.
- [75] Petrov, P., Boussard, C., Ammoun, S., Nashashibi, F. A hybrid control for automatic docking of electric vehicles for recharging. 2012. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 6225087, p. 2966-2971.
- [76] URL: [https://www.researchgate.net/publication/258670488\\_LQR\\_Control\\_for\\_a\\_Self-Balancing\\_Unicycle\\_Robot\\_on\\_Inclined\\_Plane](https://www.researchgate.net/publication/258670488_LQR_Control_for_a_Self-Balancing_Unicycle_Robot_on_Inclined_Plane).
- [77] URL: <https://forums.ni.com/t5/General-Academic-Projects/Robotic-Self-Balancing-Unicycle-Student-Design-Competition-2013/ta-p/3504512>
- [78] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_unicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_unicycle).
- [79] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6358103>.
- [80] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6640412>.
- [81] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Yaw-control-for-a-self-balancing-unicycle-robot-two-Daoxiang-Xiang/898b664343043d147ae75a00985f82febafb9972>.
- [82] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-LQR-and-PID-controllers-for-the-self-Hu-Guo/514f020fc9e193431fc001d28628ced028b8d0de>.
- [83] URL: <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/35955>.
- [84] URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317325002>.
- [85] URL: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/td-e-07112017-082249/publico/GabrielPereiradaNevesCorr17.pdf>.
- [86] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-makersrobotfriend/>
- [87] URL: [https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChcSEwit273ZgszgAhUBvIKHVAmbBcYABAGGgJscg&ohost=www.google.com&cid=CAASE-RokB2Vehib0-yQVZWshWDrIM4&sig=AOD64\\_1j13FEuxfBPPrQuc5WIE7YZYmD2uA&q=&ved=2ahUKewj0k7nZgszgAhWWwcQBHWbzDA84ChDRDHoECA0QAQ&adurl=](https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChcSEwit273ZgszgAhUBvIKHVAmbBcYABAGGgJscg&ohost=www.google.com&cid=CAASE-RokB2Vehib0-yQVZWshWDrIM4&sig=AOD64_1j13FEuxfBPPrQuc5WIE7YZYmD2uA&q=&ved=2ahUKewj0k7nZgszgAhWWwcQBHWbzDA84ChDRDHoECA0QAQ&adurl=).
- [88] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-makersrobotfriend/>.



**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



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

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

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



**Иван Леонидович Рева** – декан факультета Автоматики и вычислительной техники НГТУ, к.т.н. Основное направление научных исследований - защита речевой информации. Имеет более 20 публикаций

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

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



**Д.т.н. Любомир Димитров** – Профессор, Технический университет Софии, машиностроительный факультет, Болгария. Области интереса: мехатроника, адаптивное и оптимальное управление, интеллектуальные системы диагностики и управления, MEMS.

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



**Виталий Геннадьевич Трубин** – старший преподаватель кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».

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

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



Д.т.н. **Ярослав Носек** - профессор факультета мехатроники, информатики и междисциплинарных исследований в Техническом университете, Либерец, Чешская Республика.  
E-mail: [jaroslav.nosek@tul.cz](mailto:jaroslav.nosek@tul.cz)



**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)

Адольф-Рейчвейн Страссе 2, Зиген, Германия

Статья получена 10.02.2019.

## Advantages and Problems of Developing Unmanned One-Wheel Balancing Robots

V.A. Zhmud<sup>1</sup>, A.Yu. Ivoilov<sup>1</sup>, L.D. Dimitrov<sup>2</sup>, V.G. Trubin<sup>1</sup>, J. Nosek<sup>3</sup>, H. Roth<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Technical University of Sofia, Sofia, Bulgaria

<sup>3</sup> Technical University, Liberec, Czech Republic

<sup>4</sup> University of Siegen, Siegen, Germany

*Abstract:* This article discusses the direction of development of one-wheeled balancing robots in the near future. Russian manufacturers are clearly lagging behind the world level, however, the number of exhibitions and conferences on this subject is growing rapidly. On closer examination, unfortunately, these events only confirm the lag of domestic technologies; under the brand name of robotic devices, among other things, motorized vehicles with remote control, having no sensors, or having only video cameras, information from which is not used for making management decisions, are demonstrated these devices directly computer intelligence in these devices, bypassing the person. Of course, such devices are not robots, although they make up the arsenal of tools for robotics. In these robots, computer intelligence must independently participate in the control of mechanical motion, and this intelligence does not necessarily have to be completely located directly in these devices. The article gives the motivation of the most effective direction of development of the balancing robots, namely: a combination of balancing with the absence of a pilot and movement according to a given program in order to perform specified functions.

*Key words:* balancing robot, robotics, sigway, automation, stabilization, control

### REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud. Feedback system. Patent for invention No. 2540461. Application No. 2013145173, priority from 08.10.2013. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation on December 19, 2014. The patent expires on October 8, 2033. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, 3/36. Bul. No. 4
- [2] V.A. Zhmud. Feedback system. The patent for the invention No. 2541684. Application No. 2013146115, priority from 15.10.2013. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation on January 15, 2015. The patent expires on October 25, 2033. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, 3/36. Bul. No. 5
- [3] V.A. Zhmud. Feedback system. The patent for the invention № 2566339. Priority from 08.10.2013. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation on October 20, 2015. Byul. Number 29. The term of the patent expires 08.10.2033. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, 3/36.
- [4] V.A. Zhmud. Feedback system. The patent for the invention № 2584925. Priority from 03/03/15. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation 27.04.16. Bul. Number 14. The term of the patent expires 05.03.35. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, G01P 3/36.
- [5] V.A. Zhmud, A. Zavorin. The structure of the model for the optimization of a feedback system. The patent for the invention № 2554291. Priority from 04/01/14. Registered in the state register of inventions of the Russian Federation 27.06.15. Bulletin No. 18. The patent expires on 01/04/34. The right holder of FSBEI HPE NSTU. IPC G01R 23/02, G01P 3/36.
- [6] Certificate of state registration of the computer program “EdpCtrlServer\_v004.ru” No. 2014612791, holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Novosibirsk State Technical University”. Authors: Pechnikov A.L., Trubin V.G., Zhmud V.A. Application No. 2013660275, the date of receipt is November 11, 2013, the date of state registration in the Register of Computer Programs March 6, 2014
- [7] Certificate of state registration of the computer program “EdpCtrlClient\_v004.ru” No. 2014612792, holder: Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education “Novosibirsk State Technical University”. Authors: Pechnikov A.L., Trubin V.G., Zhmud V.A. Application No. 2013660287, the date of receipt is November 11, 2013, the date of state registration in the Register of Computer Programs March 6, 2014.
- [8] Computer Program Registration Certificate No. 2013618271 HC-SR04\_Ultrasonic\_Driver-v002. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: V.A. Zhmud, V.G. Trubin. Application No. 2013616195. Date of receipt July 18, 2013. Date of state registration in the register of computer programs September 4, 2013
- [9] Computer program registration certificate No. 2013615343 NXT\_MotorDriver-v003a. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: V.A. Zhmud, A.V. Eskin Application No. 2013616195. Date of receipt April 26, 2013. Date of state registration in the register of computer programs June 5, 2013

- [10] Computer program registration certificate No. 2013617769 Bluetooth\_HC-05\_Driver-v001. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Eskin AV, Zhmud V.A. Application No. 2013615378 dated February 13, 2013. Registered in the Register of Computer Programs on August 22, 2013.
- [11] Computer Program Registration Certificate No. 2012618604 DamMonitorNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Goncharenko A.M., Zhmud V.A. Application No. 2012616410 of July 27, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on September 21, 2012.
- [12] Computer Program Registration Certificate No. 2013611161 ZipDataFlowNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Tereshkin D.O., Zhmud V.A. Application No. 2012660916 dated December 11, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on January 9, 2013.
- [13] Computer Program Registration Certificate No. 2013611162 DefProcNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Tereshkin D.O., Zhmud V.A. Application No. 2012660917 dated December 11, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on January 9, 2013.
- [14] Computer registration certificate No. 2013611164 FlashReadNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Tereshkin D.O., Zhmud V.A. Application No. 2012660919 dated December 11, 2012. Registered in the Register of Computer Programs on January 9, 2013.
- [15] Computer Program Registration Certificate No. 2013613341 ZScannerNSTU. Copyright holder: NSTU. Russia. Authors: Goncharenko A.M., Zhmud V.A. Application No. 2013611238 of February 13, 2013. Registered in the Register of Computer Programs on February 2, 2013.
- [16] Computer program registration certificate No. 2015662198. FORS-DC-Motor-Driver-NSTU. FSBEI HPE NSTU. Russia. Authors: Zhmud V. A., Trubin V. G. Application dated 30.09.15. Published 11/18/15.
- [17] Computer Program Registration Certificate No. 2015617101. MPU6050\_Alfa-beta\_filter. FSBEI HPE NSTU. Russia. Authors: Zhmud V. A., Ivoilov A. Yu., Trubin V. G., Fedorov DS. Application dated 05/18/15
- [18] Computer program registration certificate No. 2015614444. ADXL335\_Accelerimeter\_Driver. FSBEI HPE NSTU. Russia. Authors: Zhmud V. A., Ivoilov A. Yu., Trubin V. G., Fedorov D. S. Application from 12/29/14. Posted 04/17/15.
- [19] V.A. Zhmud, A.V. Liapidevskiy. 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.
- [20] V. A. Zhmud, V. M. Semibalamut, A. S. Vostrikov. 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.
- [21] Zhmud, V., Zavorin, A. The design of the control system for object with delay and interval-given parameters. 2015. Proceedings of the “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015” 10.1109/SIBCON.2015. 7147060.
- [22] Zhmud, V., Pyakillya, B., Semibalamut, V., Trubin, M., Yadrishnikov, O. The two methods of reverse overshoot suppression in automation systems. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. 9(2-2), p. 153–157.
- [23] Zhmud, V., Pyakillya, B. Identification and control of object with time-delay link. Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering. 2017. 9(2-2), p. 109–113.
- [24] V. Zhmud, A. Liapidevskii, Boris Pyakillya. Numerical Optimization of PID-Regulator for Object with Distributed Parameters. Journal of Telecommunication Electronic and Computer Engineering. ISSN: 2180-1843. 2017. Vol. 9 No. 2-3. P. 9–114.
- [25] F. Ullmann, W. Hardt, V. A. Zhmud. Machine learning algorithms for impact localization on formed piezo metal composites. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 589–593.
- [26] V.A. Zhmud, D. B. Imekov, K. Yu. Lastochkin and A. V. Lukicheva. New Structure of Regulator for Controlling of Object with Oscillation Features and its Modelling Testing. Proceedings of International Conference on Engineering and Applied Sciences Optimization (OPT-i-2014). Kos Island, Greece, 4–6 June 2014.
- [27] Liapidevskiy, A.V., Petrov, A.S., Zhmud, V.A., Sherubneva, I.G. Shortcomings of existing systems for registration and legal protection of software products and possible ways to overcome them. Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1015(4), 042066.
- [28] Zhmud, V., Hardt, W. Practical dependance of the error of ADC on conversion frequency: Researches with mathematical modeling. 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings. 2017-November, p. 1–8.
- [29] Zhmud, V.A., Goncharenko, A.M. Modern ways of high-precision frequency measurements. 2016. 13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2016 – Proceedings. 2016. 1,7802283, p. 309–313.
- [30] Zhmud, V., Semibalamut, V., Vostrikov, A. Design of robust energy-saving regulators by means of optimization software. Testing and Measurement: Techniques and Applications. 2015. Proceedings of the 2015 International Conference on Testing and Measurement: Techniques and Applications, TMTA 2015. p. 419–424.
- [31] Using the Numerical Optimization Method for Tuning the Regulator Coefficients of the Two-Wheeled Balancing Robot. Andrei Yu. Ivoilov, Vadim A. Zhmud, Vitaly G. Trubin, Hubert Roth. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P. 228–236.
- [32] Zhmud, V. New Modeling Tested Method for Controlling of Object with Oscillation Features. Pros. Of. International Conference on Mechanical Design, Manufacture and Automation Engineering (MDMAE 2014): Phuket, Thailand.: Jan. 11-12, 2014. P. 289–296.

- [33] G. V. Sablina, I. V. Stazhilov, V. A. Zhmud. Development of rotating pendulum stabilization algorithm and research of system properties with the controller. 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. 1, ч. 3. С. 165-170.
- [34] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Trubin, V.G. The tilt angle estimation in the inverted pendulum stabilization task. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–9.
- [35] Ivoilov, A.Y., Zhmud, V.A., Roth, H. The dynamic accuracy increasing for a controlling system by means of the modified algorithm of numerical optimization of the regulator. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–7.
- [36] V.A. Zhmud, L.V. Dimitrov, O.D. Yadrishnikov. 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.
- [37] Zhmud V.A. Design of robust systems by means of the numerical optimization with harmonic changing of the model parameters / Zhmud V.A., Reva I.L., Dimitrov L.V. Journal of Physics: Conf. Series. 2017. V.803. 012185.
- [38] V. Zhmud, L. Dimitrov. Designing of complete multi-channel PD-regulators by numerical optimization with simulation. International Siberian conference on control and communications (SIBCON–2015): proc., Omsk, 21–23 May, 2015. – Omsk: IEEE, 2015. Art. 129 (6 p.).
- [39] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov. The influence of the type of the test signal on the result of numerical optimization of regulators. Journal of Physics: Conference Series. - 2017. - Vol. 803. - Art. 012186 (6 p.).
- [40] V. A. Zhmud, G. V. Sablina, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov The Use of bypass channel for feedback control of oscillatory object well-known as difficult one for control. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Moscow, 12-14 May 2016. – Moscow: IEEE, 2016. – 6 p. ISBN 2380-6516.
- [41] Zhmud, V., Dimitrov, L., Adaptive systems based on competitive quality criteria. Proc. of “2015 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2015”. 2015. 7147058. 2-s2.0-84941075474.
- [42] Zhmud, V.A., Frantsuzova, G.A., Dimitrov, L.V., Nosek, J. Experience of international collaboration in preparation of masters in "Mechatronics" with call for funds from Tempus and Erasmus programs. Journal of Physics: Conference Series. - 1015 (2018) 032190 - ISBN 1742-6588. - DOI: 10.1088/1742-6596/1015/3/032190.
- [43] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. B. Taichenachev. Model study of automatic and automated control of hysteretic object. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. – Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 655–659.
- [44] A. Y. Ivoilov, V. A. Zhmud, V. G. Trubin, L. V. Dimitrov. 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.
- [45] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. Yu. Ivoylov. Additional Simplification of the Precision Frequency Synthesizer. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00. 2018. IEEE. P.301 – 306.
- [46] Providing of Smooth Switching of Sine Signals for Precision Frequency Synthesizer. Vadim A. Zhmud2, Lubomir V. Dimitrov, Andrey Yu. Ivoylov. P. 307 – 311.
- [47] Control of Object in the Loop with Feedback Using Imperfect Sensors of Position and Acceleration. Vadim A. Zhmud, Lubomir V. Dimitrov, Vitaly Trubin, Hubert Roth. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P. 312 – 318.
- [48] Zhmud, V.A., Hardt, W., Dimitrov, L.V., Roth, H. Complex issues in regulator designing. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501669.
- [49] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling a second-order multichannel object of dimension  $3 \times 2$  with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501742.
- [50] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Liapidevskiy, A.V. Controlling of second-order two-channel object with delay. 2018 International Russian Automation Conference, RusAutoCon 2018. 8501793.
- [51] Zhmud, V.A., Kondratiev, N.O., Kuznetsov, K.A., Trubin, V.G., Dimitrov, L.V. Application of ultrasonic sensor for measuring distances in robotics. Journal of Physics: Conference Series. 2018. 1015(3), 032189.
- [52] V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov, A. V. Taichenachev. The use of sigma-delta-ADC in the commutation mode. International Siberian conference on control and communications (SIBCON): proc., Kazakhstan, Astana 29–30 June 2017. Astana: S. Seifullin Kazakh Agrotechn. Univ., 2017. P. 640–643.
- [53] Zhmud, V. A.; Dimitrov, L. V.; Roth, H. A New Approach to Numerical Optimization of a Controller for Feedback System. Proc. of 2nd International Conference on Applied Mechanics, Electronics and Mechatronics Engineering (AMEME) Местоположение: Beijing, Peoples Resp. China. Oct. 22-23, 2017.: DEStech Transactions on Engineering and Technology Research P.: 213–219.
- [54] Zhmud, V., Dimitrov, L., Semibalamut, V., Taichenachev, A. Calculation of PID-regulator for MISO system with the method of numerical optimization. 2017 International Siberian Conference on Control and Communications, SIBCON 2017 – Proceedings. 2017. 7998568.
- [55] Zhmud, V.A., Semibalamut, V.M., Dimitrov, L.V. Investigation of compensation and other methods for controlling of oscillating objects. Proceedings - 2016 11th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2016. 2017. 7884174, p. 538–543.
- [56] Zhmud, V.A., Dimitrov, L.V., Hardt, W. Automatic identification of controlled objects. Moscow Workshop on Electronic and Networking Technologies, MWENT 2018 – Proceedings. 2018. 2018-March, p. 1–8.

- [57] Smart Phase Locking of the Frequency of Two Identical Lasers to Each Other. Vadim A. Zhmud, Aleksey V. Taichenachev, Lubomir V. Dimitrov, Vladimir M. Semibalamut. 2018 14th International Scientific-Technical Conference APEIE – 44894. 978-1-5386-7054-5/18/\$31.00 2018. IEEE. P.319–326.
- [58] Zhmud, V., Dimitrov, L. Investigation of the causes of noise in the result of multiple digital derivations of signals: Researches with mathematical modeling. 11th International IEEE Scientific and Technical Conference “Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines” Dynamics 2017 – Proceedings. 2017-November, p. 1–9.
- [59] Petrov, P., Georgieva, V. Geometric path planning and tracking control with bounded steering angle for the parking problem of automatic vehicles. 2018. AIP Conference Proceedings 2048,060017
- [60] Petrov, P., Georgieva, V. Adaptive velocity control for a differential drive mobile robot. 2018. 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447091
- [61] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-based position regulation of differential-drive mobile robots. 2018. 20th International Symposium on Electrical Apparatus and Technologies, SIELA 2018 – Proceedings. 8447066
- [62] Petrov, P., Georgieva, V. Vision-Based Line Tracking Control for Nonholonomic Differential-Drive Mobile Robots. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439461.
- [63] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Ultrasound Image Processing for Improving Diagnose of Renal Diseases. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439641.
- [64] Georgieva, V., Petrov, P., Mihaylova, A. Visual Marker Recognition with Application to Mobile Robot Localization. 2018. 9th National Conference with International Participation, Electronica 2018 – Proceedings. 8439217.
- [65] Petrov, P. Dynamics and adaptive motion control of a two-wheeled inverted pendulum robot. 2018. Comptes Rendus de L'Academie Bulgare des Sciences. 71(7), p. 945-954.
- [66] Georgieva, V., Petrov, P., Nagy, S., Sziová, B. Detecting contours of pathological forms in colonoscopy images using a hybrid method. 2018. Communication, Electromagnetics and Medical Application. 2018-October, pp. 27-30.
- [67] Georgieva, V.M., Mihaylova, A.D., Petrov, P.P. An application of dental X-ray image enhancement. 2017. 2017 13th International Conference on Advanced Technologies, Systems and Services in Telecommunications, TELSIKS 2017 – Proceeding. 2017-October, p. 447-450.
- [68] Petrov, P., Dimitrov, L., Aleksandrov, D. Longitudinal adaptive control of mobile robots in a platoon. 2016. ACM International Conference Proceeding Series. p. 21-25.
- [69] Petrov, P., Nashashibi, F. Automatic vehicle perpendicular parking design using saturated control. 2015. 2015 IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies, AEECT 2015. 7360566.
- [70] Petrov, P., Nashashibi, F. Saturated feedback control for an automated parallel parking assist system. 2014. 2014 13th International Conference on Control Automation Robotics and Vision, ICARCV 2014. 7064368, pp. 577-582.
- [71] Petrov, P., Nashashibi, F. Modeling and nonlinear adaptive control for autonomous vehicle overtaking. 2014. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. 15(4),6754174, p. 1643-1656.
- [72] Petrov, P., Nashashibi, F. Adaptive steering control for autonomous lane change maneuver. 2013. IEEE Intelligent Vehicles Symposium, Proceedings. 6629570, p. 835-840.
- [73] Panev, S., Petrov, P., Boumbarov, O., Tonchev, K. Human gaze tracking in 3D space with an active multi-camera system. 2013. Proceedings of the 2013 IEEE 7th International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems, IDAACS 2013. 1,6662719, p. 419-424.
- [74] Janosevic, D., Mitrev, R., Andjelkovic, B., Petrov, P. Quantitative measures for assessment of the hydraulic excavator digging efficiency. 2012. Journal of Zhejiang University: Science A. 13(12), p. 926-942.
- [75] Petrov, P., Boussard, C., Ammoun, S., Nashashibi, F. A hybrid control for automatic docking of electric vehicles for recharging. 2012. Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. 6225087, p. 2966-2971.
- [76] URL: [https://www.researchgate.net/publication/258670488\\_LQR\\_Control\\_for\\_a\\_Self-Balancing\\_Unicycle\\_Robot\\_on\\_Inclined\\_Plane](https://www.researchgate.net/publication/258670488_LQR_Control_for_a_Self-Balancing_Unicycle_Robot_on_Inclined_Plane).
- [77] URL: <https://forums.ni.com/t5/General-Academic-Projects/Robotic-Self-Balancing-Unicycle-Student-Design-Competition-2013/ta-p/3504512>
- [78] URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Electric\\_unicycle](https://en.wikipedia.org/wiki/Electric_unicycle).
- [79] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6358103>.
- [80] URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6640412>.
- [81] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Yaw-control-for-a-self-balancing-unicycle-robot-two-Daoxiang-Xiang/898b664343043d147ae75a00985f82febaf9972>.
- [82] URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Design-of-LQR-and-PID-controllers-for-the-self-Hu-Guo/514f020fc9e193431fc001d28628ced028b8d0de>.
- [83] URL: <https://www.um.edu.mt/library/oar/handle/123456789/35955>.
- [84] URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785317325002>.
- [85] URL: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3139/tde-07112017-082249/publico/GabrielPereiradaNevesCorr17.pdf>.
- [86] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-robots-makerrobotfriend/>
- [87] URL: [https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChcSEwit273ZgszgAhUByrIKHVAmBBcYA BAGGgJscg&ohost=www.google.com&cid=CAASE-RokB2Vehib0-yQVZWshWDrIM4&sig=AOD64\\_1j13FEuxfBPrOu c5WIE7YZYmD2uA&q=&ved=2ahUKEwj0k7nZgs](https://www.googleadservices.com/pagead/aclk?sa=L&ai=DChcSEwit273ZgszgAhUByrIKHVAmBBcYA BAGGgJscg&ohost=www.google.com&cid=CAASE-RokB2Vehib0-yQVZWshWDrIM4&sig=AOD64_1j13FEuxfBPrOu c5WIE7YZYmD2uA&q=&ved=2ahUKEwj0k7nZgs)

[zgAhWWwcQBHWbzDA84ChDRDHoECA00QAQ&adurl=](http://zgAhWWwcQBHWbzDA84ChDRDHoECA00QAQ&adurl=)

[88] URL: <https://blog.adafruit.com/2018/05/30/robot-archaeology-bicycle-style-self-balancing-robots-robots-makerrobotfriend/>.



**Vadim 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



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

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

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



Dr. of Techn. Sci. **Lubomir Dimitrov**.

Full Professor.  
Technical University of Sofia,  
Faculty of Mechanical Engineering,  
Bulgaria

Mechatronics, Adaptive and optimal control, Intelligent diagnostic and control systems, MEMS.

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



**Ivan Reva** – Dean of Faculty of Automation and Computer Techniques in NSTU, PhD, Ass. Professor.

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

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



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

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



Dr. of Techn. Sci. **Jaroslav Nosek** – Professor of Faculty of Mechatronics, Informatics and Interdisciplinary Studies in Technical University, Liberec, Czech Republic.

E-mail: [jaroslav.nosek@tul.cz](mailto:jaroslav.nosek@tul.cz)



**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 has been received on 10.02.2019.

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

### Содержание раздела:

- ◇ Ю.Е. Воскобойников. Оптимизация мультипликативных алгоритмов вейвлет-фильтрации изображений. Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин). ФГБОУ ВО Новосибирский государственный технический университет, просп. Карла Маркса, д.20, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 48–53.
- ◇ Х.Н.Зайнидинов, Ф.Ф. Ражабов, Г.М. Ходжиматов. Мобильная компьютерная система для диагностики состояния органов желудочно-кишечного тракта на основе Bluetooth технологий. Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми, Андижанский государственный медицинский институт. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 54–64.
- ◇ Ю.Н. Фомин, В.М. Семибаламут, В.А. Жмудь, С.В. Панов, М.Д. Парушкин, Л.В. Димитров. Результаты деформографических измерений в штольне на обсерватории Талая. Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия. Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 65–76.
- ◇ Ю.Н. Фомин, В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, С.В. Панов, М.Д. Парушкин, Л.В. Димитров. Результаты наблюдений долговременных колебаний земной коры в Байкальской рифтовой зоне. Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия. Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 77–86.
- ◇ Ю.Н. Фомин, В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Д.О. Терешкин, С.В. Панов, Л.В. Димитров. Применение метода эмпирической модовой декомпозиции для обработки результатов деформографических измерений. Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия. Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 87–100.
- ◇ Ю.Н. Фомин, В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Д.О. Терешкин, С.В. Панов, Л.В. Димитров. Анализ сигнала измерителя деформаций земной коры в Байкальской рифтовой зоне. Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия. Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 101–108.

УДК 519.2

# Оптимизация мультипликативных алгоритмов вейвлет-фильтрации изображений

Ю.Е. Воскобойников<sup>1,2</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 последнее время появились публикации, посвященные так называемым мультипликативным алгоритмам вейвлет-фильтрации. В этих алгоритмах для каждого коэффициента разложения зашумленного сигнала определяется свой «индивидуальный» фильтрующий множитель. При этом учитывается энергия коэффициентов разложения, находящихся в некоторой близости от обрабатываемого коэффициента разложения. Однако, для эффективной минимизации ошибок вейвлет-фильтрации изображений этими алгоритмами необходимо подобрать вид фильтрующего множителя и значение параметр, от которого существенно зависит ошибка фильтрации. В литературе эти два момента не получили приемлемого для практики решения. Поэтому в данной работе предлагается новый фильтрующий множитель и алгоритм оценивания оптимального параметра этого множителя. Все это позволяет получить ошибку фильтрации, меньшую по сравнению с другими множителями, приведенными в литературе и говорить об оптимизации мультипликативного алгоритма вейвлет-фильтрации в целом. Выполненные исследования показали эффективность предлагаемого подхода к оптимизации мультипликативного алгоритма фильтрации и возможность его использования на практике.

*Ключевые слова:* вейвлет-представление изображений, мультипликативные алгоритмы вейвлет-фильтрации изображений, выбор фильтрующего множителя, оценивание оптимального параметра фильтрующего множителя.

## ВВЕДЕНИЕ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В последние три десятилетия для фильтрации изображений часто используются алгоритмы вейвлет-фильтрации, основанные на обработке коэффициентов разложения зашумленного изображения в ортогональном базисе вейвлет-функций [1, 2]. Можно выделить два класса алгоритмов обработки зашумленных коэффициентов разложения: *пороговые* и *мультипликативные*.

В пороговых алгоритмах (получивших широкое распространение на практике) коэффициент разложения меньший по абсолютной величине некоторой пороговой величины зануляется, в противном случае такой коэффициент сохраняется или подвергается некоторому (в общем случае нелинейному) преобразованию (в зарубежной литературе такая обработка получила название *thresholding*). Пороговая величина существенно влияет на ошибку фильтрации (подробнее см. [1, 3]).

Характерной чертой мультипликативных алгоритмов является наличие *фильтрующего множителя* для каждого коэффициента разложения зашумленного изображения (такая обработка коэффициентов разложения получила название *shrinkaging*) [4, 5]. Ошибка фильтрации мультипликативных алгоритмов определяется двумя факторами: видом фильтрующего множителя и значениями

параметров, входящих в этот фильтрующий множитель. Очевидно, что подбором фильтрующего множителя и его параметров можно минимизировать ошибку фильтрации, что и составляет суть *задачи оптимизации мультипликативных алгоритмов вейвлет-фильтрации*.

В соответствующих научных публикациях эта задача не получила приемлемого (для практики) решения (особенно оценивание оптимальных параметров фильтрующего множителя). Поэтому *целью данной работы является построение эффективного фильтрующего множителя (дающего меньшую ошибку фильтрации по сравнению с известными фильтрующими множителями) и разработка алгоритма, который бы с приемлемой точностью оценивал оптимальные значения параметра этих множителей*.

## 1. МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЕ АЛГОРИТМЫ ВЕЙВЛЕТ-ФИЛЬТРАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На практике изображение задается матрицей  $F$  (уровень разложения  $j_0$ ). На первом уровне разложения этого изображения в ортогональных базисах вейвлет-функций (номер разложения  $j_0 + 1$ ) вычисляются аппроксимирующие коэффициенты  $A_1$ , детализирующие коэффициенты  $H_1$ ,  $V_1$ ,  $D_1$ . На втором уровне разложения (номер  $j_0 + 2$ ) аналогичной

обработке подвергается матрица коэффициентов  $A_1 \rightarrow (A_2, H_2, V_2, D_2)$ . Обобщая, приходим к следующей схеме разложения [3, с. 47-51]:

$$F \rightarrow (A_1, H_1, V_1, D_1) \rightarrow (A_2, H_2, V_2, D_2, H_1, V_1, D_1) \rightarrow \dots$$

Отметим закономерность изменения размеров двумерных массивов коэффициентов разложения, а именно: на каждом уровне разложения размеры массивов новых коэффициентов *уменьшаются в два раза* по сравнению с предыдущими массивами. При этом сумма размеров всех массивов коэффициентов равна размеру исходной матрицы  $F$ , что говорит о сохранении «объема» информации, содержащейся в  $F$ .

Было показано (см. например [3, с. 59-60]), что при разложении зашумленного изображения ошибки вычисления детализирующих коэффициентов на 2 порядка и более выше по сравнению с аппроксимирующими коэффициентами. Поэтому на втором этапе вейвлет-фильтрации обработке подвергаются только детализирующие коэффициенты. Для удобства дальнейшей записи алгоритмов обработки любой из детализирующих коэффициентов будем обозначать как  $d_{n,m}^j$ , где индексы  $n, m$  определяют номер строки и столбца соответствующей матрицы коэффициентов разложения (номер уровня разложения при этом  $j$  опускается).

Общим недостатком пороговых алгоритмов обработки (часто используемых на практике) является то, что все коэффициенты некоторого уровня разложения обрабатываются с одной (или двумя) одинаковыми пороговыми величинами, что не позволяет учитывать «энергию» каждого коэффициента разложения при его обработке. Поэтому в ряде публикаций был предложен подход, который в определенной степени устраняет этот недостаток и учитывает энергию коэффициентов разложения, находящихся в некоторой близости от обрабатываемого коэффициента разложения.

Изложим один из таких алгоритмов [5] применимо к фильтрации изображений. Определим апертуру  $B_{n,m}$ , которая включает в себя коэффициенты разложения  $d_{p,q}^j$  зашумленного изображения (номер уровня разложения опускается) с индексами:

$$n-L \leq p \leq n+L, \quad m-L \leq q \leq m+L,$$

т.е. коэффициенты  $d_{p,q}^j$  принадлежат квадрату с центром в точке  $(n, m)$  и длинами сторон  $(2L+1)$ ,  $L$  - параметр апертуры. Общее число

коэффициентов, попавших в апертуру равно  $M = (2L+1)^2$ . Далее введем величину

$$S_{n,m}^2 = \sum_{p,q \in B_{n,m}} d_{p,q}^j \quad (1)$$

и запишем алгоритм обработки коэффициента  $d_{n,m}^j$  в виде:

$$\hat{d}_{n,m} = w_{n,m}^{(1)} \cdot d_{n,m}^j, \quad (2)$$

где фильтрующий множитель  $w_{n,m}^{(1)}$  определяется выражением:

$$w_{n,m}^{(1)} = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{n,m} < \lambda_j^{(1)}; \\ 1 - \left( \frac{\lambda_j^{(1)}}{S_{n,m}} \right)^2, & \text{если } S_{n,m} \geq \lambda_j^{(1)}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\lambda_j^{(1)} = \sigma \sqrt{2 \cdot \ln(N_j)}$  - пороговая величина,  $\sigma$  - среднее квадратическое отклонение шума регистрации изображения,  $N_j$  - общее число элементов матрицы детализирующих коэффициентов на  $j$ -ом уровне разложения. В работе [6] было показано, что этот фильтрующий множитель (3) не минимизирует ошибку фильтрации и поэтому в этой же работе была предложена модификация этого множителя путем введения параметра  $\beta$ :

$$w_{n,m}^{(1)}(\beta) = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{n,m} < \beta \lambda_j^{(1)}; \\ 1 - \left( \beta \frac{\lambda_j^{(1)}}{S_{n,m}} \right)^2, & \text{если } S_{n,m} \geq \beta \lambda_j^{(1)}, \end{cases} \quad (4)$$

и предложен алгоритм вычисления оценки для оптимального параметра  $\beta_{opt}$ , минимизирующего среднее квадратическую ошибку фильтрации (СКО). Хотя множители (3), (4) учитывают энергию коэффициентов разложения в некоторой окрестности от обрабатываемого коэффициента разложения, но они не учитывают интегральные спектральные характеристики всех коэффициентов разложения данного уровня и относительный вклад в эти характеристики обрабатываемого коэффициента. Заметим, что и другие фильтрующие множители не свободны от этого недостатка [7,8].

Поэтому в данной работе предлагается фильтрующий множитель вида:

$$w_{n,m}^{(2)}(\beta) = \begin{cases} 0, & \text{если } S_{n,m} < \beta \lambda_j^{(2)}; \\ 1 - \left( \beta \frac{\lambda_j^{(2)}}{S_{n,m}} \right)^j, & \text{если } S_{n,m} \geq \beta \lambda_j^{(2)}, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } \lambda_j^{(2)} = \sigma \cdot \frac{S_{\max} - S_{n,m}}{S_{\max} + S_{\min}} \sqrt{\ln\left(\frac{\hat{N}_j}{j}\right)}, \quad \hat{N}_j = \frac{\sqrt{N_j}}{j},$$

$S_{\max} = \sqrt{\max\{S_{n,m}^2\}}$ ,  $S_{\min} = \sqrt{\min\{S_{n,m}^2\}}$ . Видно, что множитель (5) также содержит параметр  $\beta$ , который нужно определить из условия минимума СКО.

Для этого обратимся к критерию оптимальности параметрического алгоритма фильтрации [3, с. 111-113]. Хотя критерий имеет строгое обоснование только для линейных алгоритмов, но он позволял достаточно точно оценить оптимальные пороговые величины пороговых функций нелинейных алгоритмах вейвлет-фильтрации [9]. Приведем основные расчетные соотношения для оценивания  $\beta_{opt}$  (подробнее см. [3,9]).

Введем следующую статистику:

$$\rho_w(\beta) = \frac{1}{\sigma^2} \left( \hat{F}^{\%} - \hat{f}(\beta) \right)^T \cdot \hat{F}^{\%},$$

где  $\hat{F}^{\%}$ - вектор составленный из столбцов «зашумленной» матрицы изображения  $F^{\%}$ ,  $\hat{f}(\beta)$ - вектор составленный из столбцов матрицы  $\hat{F}(\beta)$  - результата вейвлет-фильтрации с использованием фильтрующего множителя  $w_{n,m}(\beta)$  с заданной величиной параметра  $\beta$ . В качестве оценки для  $\beta_{opt}$  примем величину  $\beta_w$ , для которой выполняется неравенство:

$$\mathfrak{G}_{\frac{\alpha}{2}, N} < \rho_w(\beta_w) < \mathfrak{G}_{1-\frac{\alpha}{2}, N}, \quad (6)$$

$\mathfrak{G}_{\frac{\alpha}{2}, N}, \mathfrak{G}_{1-\frac{\alpha}{2}, N}$  - квантили  $\chi^2$ -распределения с числом степеней свободы  $N$  уровней  $\frac{\alpha}{2}, 1-\frac{\alpha}{2}$  соответственно,  $\alpha$ - вероятность ошибки первого рода при проверке статистической гипотезы об оптимальности значения  $\beta_w$  (обычно  $\alpha = 0.05$ );  $N$  - общее число элементов фильтруемой матрицы  $F^{\%}$ . Вычисленное значение  $\beta_w$  подставляется в выражение (5).

Заметим, что вычисление  $\beta_w$  сводится к решению уравнения

$$\rho_w(\beta) = N.$$

Итерационный процесс решения этого нелинейного уравнения (вычисляется последовательность приближенных решений  $\beta^{(n)}$ ) прекращается, как только  $\rho_w(\beta^{(n)})$  удовлетворяет неравенству (6). Это обуславливает возможность эффективно использовать «медленные» итерационные алгоритмы (например, метод дихотомии - деление отрезка пополам). Как правило, при

обработке изображений  $N > 30$  и границы неравенства (5) при  $\alpha = 0.05$  вычисляются по формулам:

$$\mathfrak{G}_{0.025, N} = N - 1.96\sqrt{2N}, \quad \mathfrak{G}_{0.975, N} = N + 1.96\sqrt{2N}.$$

Это следует из того факта, что при  $N > 30$   $\chi^2$ -распределение с числом степеней свободы  $N$  хорошо аппроксимируется нормальным распределением с математическим ожиданием  $N$  и дисперсией  $2N$ .

Если дисперсия шума  $\sigma^2$  неизвестна, то можно использовать ее оценку

$$\hat{\sigma}^2 = \left[ \frac{\text{median}\{|d^{\%}\| \}}{0.06745} \right]^2, \quad \text{где } \text{median}\{|d^{\%}\| \} -$$

вычисление медианы модулей диагональных детализирующих коэффициентов первого уровня разложения. Показано [3, с. 76], что эта оценка имеет приемлемую точность (погрешность оценивания составляет 8%-10%).

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОЦЕНКИ $\beta_w$

Перейдем к исследованию свойства оптимальности оценки  $\beta_w$ . Для этого был проведен обширный вычислительный эксперимент по фильтрации изображений с различными частотными свойствами. Остановимся только на результатах фильтрации изображения *LENA* (Рис. 1), которое является стандартным изображением при тестировании алгоритмов обработки двумерных сигналов. В качестве вейвлетов использовались ортогональные вейвлеты Добеши [8].



Рис. 1. Тестовое изображение LENA

Точные значения изображения искажались нормально распределенным шумом измерений с нулевым средним и дисперсией, вычисляемой по задаваемому относительному уровню шума,

определяемому выражением  $\delta = \frac{\|\hat{F}^{\%} - F\|}{\|F\|}$ , где

$\|\cdot\|$  - евклидова норма матрицы. Точность

фильтрации характеризовалась относительной ошибкой  $\delta_{\hat{F}}(\beta) = \frac{\|\hat{F}_{\beta} - F\|}{\|F\|}$ , где  $\hat{F}_{\beta}$  - изображение, отфильтрованное с множителем (5) при заданном параметре  $\beta$ .

На Рис. 2 приведены результаты исследований точности фильтрации изображения с относительным уровнем шума  $\delta = 0.06$ , размер апертуры задавался  $5 \times 5$ . Сплошной линией показана зависимость относительной ошибки фильтрации  $\delta_{\hat{F}}(\beta)$  от величины параметра  $\beta$ , точечной кривой – зависимость  $\rho_w(\beta)$ , пунктирными прямыми границы интервала (6) (из-за масштаба рис. 2 они слились в одну прямую). Значения  $\beta_w$ , для которых  $\rho_w(\beta_w)$  находится между пунктирными прямыми (на рис.  $\rho_w(\beta_w)$  пересекает пунктирную линию) могут приняты в качестве оценок для оптимального значения  $\beta_{opt}$ . Видно, что эти значения  $\beta_w$  соответствуют минимальным значениям ошибки фильтрации, что графически показывает эффективность оценки  $\beta_w$  в фильтрующем множителе (5).

В качестве количественной характеристики точности оценки  $\beta_w$  введем коэффициент эффективности, определяемый выражением  $E = \frac{\delta_{\hat{F}}(\beta_{opt})}{\delta_{\hat{F}}(\beta_w)}$ . Очевидно, что чем больше  $E$  отклоняется от 1 к нулю, тем больше проигрыш по точности алгоритма фильтрации с параметром  $\beta_w$  по сравнению с минимально возможной ошибкой  $\delta_{\hat{F}}(\beta_{opt})$ .

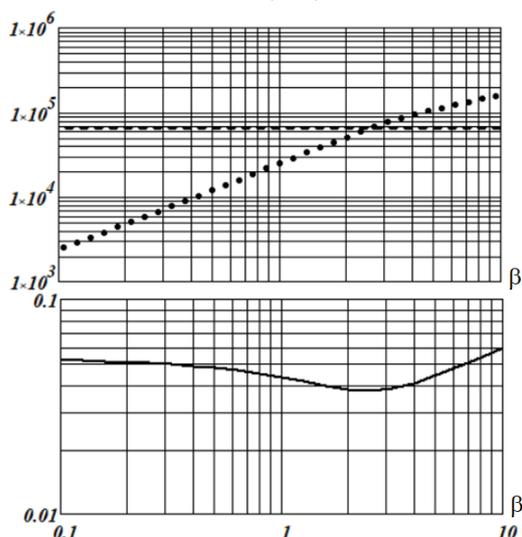


Рис. 2. К эффективности оценки  $\beta_w$

Величина  $E$  является случайной величиной и для вычисления ее среднего значения был проведен вычислительный эксперимент, в

котором для каждой зашумленной матрице изображения LENA  $F^{(l)} = F + \eta^{(l)}, l = 1, 2, \dots, N_{sam} = 50$ , вычислялись отфильтрованные изображения  $\hat{F}_{\beta_w}^{(l)}, \hat{F}_{\beta_{opt}}^{(l)}$  и по ним определялось значение  $E^{(l)}$  -  $l$ -ый элемент выборочной совокупности  $\{E^{(l)}\}, l = 1, 2, \dots, N_{sam}$ . По этой выборочной совокупности находились: среднее значение  $\bar{E}$ , минимальное значение  $E_{min}$ , максимальное значение  $E_{max}$ , приведенные в таблице для разных уровней шума  $\delta$ . Примерно такие же результаты были получены и при фильтрации других тестовых изображений. Сравнение величин  $\delta_{\hat{F}}(\beta_{opt})$  для множителей (4), (5) показало меньшую (на 5-10%) минимальную ошибку фильтрации с использованием множителя (5).

Таблица.

Коэффициенты эффективности оценки  $\beta_w$

$\delta$	$E_{min}$	$\bar{E}$	$E_{max}$
0.02	0.813	0.923	0.993
0.05	0.839	0.949	0.994
0.10	0.883	0.963	0.995

## ВЫВОДЫ

Анализируя числовые характеристики коэффициента эффективности, приведенные в таблице, можно сделать следующие выводы:

- фильтрующий множитель (5) имеет большую потенциальную точность по сравнению с часто используемым множителем (4) (при параметре  $\beta = \beta_{opt}$ );
- предложенный выбора параметра множителя (5) позволяет достаточно точно оценить оптимальное значение  $\beta_{opt}$ , не привлекая при этом априорную информацию о фильтруемом изображении.

Учитывая выше сказанное, можно рекомендовать использовать мультипликативный алгоритм вейвлет-фильтрации (2) с фильтрующими множителями  $w^{(2)}(\beta_w)$ .

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Mallat S. A. Wavelet tour of signal processing: the sparse way. Academic Press, 2008. 621 p.
- [2] Смоленцев Н. К. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MatLAB. М.: ДМК, 2005. 304 с.
- [3] Воскобойников Ю. Е. Алгоритмы вейвлет-фильтрации с примерами в пакете MathCAD. Palmarium Academic Publishing, 2016. 196 с.
- [4] Chen G.Y. Multiwavelet denoising using neighboring coefficients. IEEE Signal Processing Letters. 2003. vol.10. no.7. P. 211-214.
- [5] Rao B.C., Latha M.M. Selective neighboring wavelet coefficients approach for image denoising. International journal of computer science and

- communication. 2011. vol. 2. no. 1. P. 73-77.
- [6] Воскобойников Ю.Е. Оценивание оптимальных параметров одного класса мультипликативных алгоритмов вейвлет-фильтрации изображений // Автометрия. 2017. т. 53. № 4. С. 112-119.
- [7] Krishna G., Nagarjuna R., Dhanaraj C. An adaptive wavelet thresholding image denoising method using neighboring wavelet coefficients. International journal of innovation research in engineering & science. 2013. vol. 9. no. 2. P. 46-59.
- [8] Om H., Biswas M. An improved image denoising method based on wavelet thresholding. Journal of Signal and Information Processing. 2012. vol.3. no. 1. P. 109-116.
- [9] Voskoboynikov Yu. E. Estimating optimum threshold sizes in a wavelet-filtration algorithms. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2011. vol. 47. no. 2. P. 3-14.



**Юрий Евгеньевич Воскобойников**, выпускник кафедры автоматизации 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 автоматизации НГТУ. Автор более 295 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)

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

Статья поступила 08.02.2019

## Optimization of Multiplicative Image Wavelet Filtering Algorithms

Yu.E. Voskoboynikov<sup>1,2</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:* recently, there have been publications devoted to the so-called multiplicative algorithms of wavelet filtering. In these algorithms for each coefficient of decomposition of the noisy signal the "individual" filtering factor is defined. This takes into account the energy of the expansion coefficients, which are in some proximity to the processed expansion coefficient. However, to effectively minimize the errors of wavelet filtering of images by these algorithms, it is necessary to choose the type of filtering factor and the value of the parameter, on which the filtering error depends significantly. In the literature, these two points have not received a practical solution. Therefore, in this paper we propose a new filtering factor and an algorithm for estimating the optimal parameter. All this makes it possible to obtain a filtering error smaller in comparison with other factors given in the literature and talk about the optimization of the multiplicative wavelet filtering algorithm as a whole. The performed studies showed the effectiveness of the proposed approach to optimize a multiplication filtering algorithm and the possibility of its use in practice.

*Key words:* wavelet representation of images, multiplicative algorithms of wavelet filtering of images, selection of the filtering factor, estimation of the optimal parameter of the filtering factor.

### REFERENCES

- [1] Mallat S. A. Wavelet tour of signal processing: the sparse way. Academic Press, 2008. 621 p.
- [2] Smolentsev N. K. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MatLAB. M.: DMK, 2005. 304 s.
- [3] Voskoboynikov YU. Ye. Algoritmy veyvlet-fil'tratsii s primerami v pakete MathCAD. Palmarium Academic Publishing, 2016. 196 s.
- [4] Chen G.Y. Multiwavelet denoising using neighboring coefficients. IEEE Signal Processing Letters. 2003. vol.10. no.7. P. 211-214.
- [5] Rao B.C., Latha M.M. Selective neighboring wavelet coefficients approach for image denoising. International journal of computer science and communication. 2011. vol. 2. no. 1. P. 73-77.
- [6] Voskoboynikov YU.Ye. Otsenivaniye optimal'nykh parametrov odnogo klassa mul'tiplikativnykh algoritmov veyvlet-fil'tratsii izobrazheniy // Avtometriya. 2017. t. 53. № 4. S. 112-119.
- [7] Krishna G., Nagarjuna R., Dhanaraj C. An adaptive wavelet thresholding image denoising method using neighboring wavelet coefficients. International journal of innovation research in engineering & science. 2013. vol. 9. no. 2. P. 46-59.
- [8] Om H., Biswas M. An improved image denoising method based on wavelet thresholding. Journal of Signal and Information Processing. 2012. vol.3. no. 1. P. 109-116.
- [9] Voskoboynikov Yu. Ye. Estimating optimum threshold sizes in a wavelet-filtration algorithms.

Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2011. vol. 47. no. 2. P. 3–14.



**Yury Voskoboynikov**, 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.

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

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

The paper was received on 02.08.2019.

# Мобильная компьютерная система для диагностики состояния органов желудочно-кишечного тракта на основе Bluetooth технологий

*Х.Н.Зайнидинов<sup>1</sup>, Ф.Ф. Ражабов<sup>1</sup>, Г.М. Ходжиматов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми

<sup>2</sup>Андижанский государственный медицинский институт

*Аннотация.* Рассматривается реализация мобильной компьютерной системы для диагностики состояния органов желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) на основе Bluetooth технологий, описывается ее алгоритмическое и программное обеспечение. Система предназначена для проведения компьютерной функциональной экспресс-диагностики состояния органов ЖКТ и отличается неинвазивностью методики обследований пациентов, оперативностью получения числовых значений медицинских показателей, мобильностью и невысокой стоимостью. Теоретическую основу алгоритмов исследования медленных гастроволн составляют современные методы обобщенного спектрального анализа нестационарных сигналов.

*Ключевые слова:* диагностика, биомедицинские технологии, информационные технологии, измерения, обработка сигналов

## ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в различных странах, в том числе в Узбекистане, интенсивно развиваются новые специализированные, компьютеризированные методы и средства обработки и исследований различных биомедицинских сигналов [1, 10, 17–19]. Разрабатываются и широко внедряются в клиническую практику новые информативные методы анализа данных. Компьютеры используются в медицине давно, и многие современные методы диагностики базируются на информационных технологиях (ИТ). Такие методы обследования, как УЗИ или компьютерная томография, вообще немыслимы без компьютера. Трудно сейчас найти область медицины, в которой компьютеры не применялись бы все более и более активно. Но применение компьютеров в медицине не ограничивается только диагностикой. Они все активнее начинают использоваться и при лечении различных заболеваний, начиная от составления оптимального плана лечения до управления различным медицинским оборудованием во время проведения процедур [1, 9, 10, 11, 19].

Для решения проблем диагностики состояния органов брюшной полости, широко применяются современные инструментальные средства, причем в последнее время значительно возрастает роль новых информационных технологий. Одним из главных проявлений мышечной активности органов желудочно-кишечного тракта (ЖКТ) являются так называемые медленные перистальтические волны (МПВ) [1]. Колебания мышц преобразуются в биоэлектрические сигналы и

передаются на поверхность тела, где регистрируются специальными приборами электрогастрографами. Методы обработки сигналов на основе компьютеров дают возможность перейти от субъективного анализа кривых к оценкам числовых параметров, показывающим, в какой степени развивается заболевание того или иного органа, либо наоборот – насколько успешно идет лечение с течением времени.

Сегодня в мире медицинской промышленностью разработаны электронные приборы и системы для проведения электрогастрографии (ЭГГ), в частности, исследования моторной функции ЖКТ [2]. Многим системам такого назначения присущи инвазивность (т.е. внешнее воздействие на организм, вызывающее болезненные ощущения), высокая стоимость оборудования, недоступная для многих клиник. Перспективным направлением неинвазивной функциональной диагностики является селективная ЭГГ [3]. Принципы диагностирования острых заболеваний органов ЖКТ, требующих хирургического вмешательства, основаны на разделении частот МПВ, генерируемых органами. Сигналы биоэлектрической активности могут усиливаться одновременно по нескольким каналам, фильтроваться и преобразовываться периферийным оборудованием компьютера. Типовое значение доминантной частоты (ДЧ) электрических колебаний, поступающих от желудка, составляет  $0,05 \text{ Гц}$  для пациентов группы «норма». Для двенадцатиперстной кишки эта величина равна  $0,2 \text{ Гц}$ , для тонкой кишки –  $0,15 \text{ Гц}$ , для толстой –  $0,1 \text{ Гц}$ . При

обследовании больных пациентов наблюдаются отклонения от данных стандартных значений.

## 1. МОБИЛЬНАЯ КОМПЬЮТЕРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ ОРГАНОВ ЖЕЛУДОЧНО-КИШЕЧНОГО ТРАКТА

На современном этапе разработок систем медицинской информатики наибольшее развитие получили методы и средства электрокардиографии (ЭКГ) и электроэнцефалографии (ЭЭГ) на основе компьютерной техники. Вместе с тем в последние годы во многих странах мира значительные успехи наблюдаются в деле создания компьютерных диагностических систем для такой области медицины, как гастроэнтерология. Инвазивные методы обследования состояния органов брюшной полости, т.е. такие, которые связаны с введением датчиков внутрь организма (например, баллонография, гастроскопия, рН-метрия), что вызывает болезненные ощущения пациентов, уступают свое место неинвазивным методам. Последние во многом основаны на достижениях электрогастрографии (ЭГГ), т.е. на способах регистрации и последующем анализе динамики биопотенциалов, снимаемых с поверхности тела и доставляющих информацию о мышечной активности органов желудочно-кишечного тракта (ЖКТ). Необходимо дальнейшее совершенствование математического и программного обеспечения информационных систем для ЭГГ и улучшения характеристик соответствующей аппаратуры.

Методики, связанные с областью ЭГГ, применяются как при терапевтических, так и при хирургических лечениях заболеваний органов ЖКТ. Их преимущество заключается в том, что показатели состояния органов человека могут быть оценены количественно. Это особенно важно с точки зрения профилактики заболеваний населения, а также своевременного лечения обнаруженных нарушений деятельности органов ЖКТ.

Мобильная компьютерная ЭГГ система состоит из автономного портативного беспроводного (*Bluetooth*) измерительного прибора (модуля) и компьютера работающего под ОС *MS Windows*.

Автономное питание, беспроводность обеспечивает мобильность и высокое качество снимаемого полезного сигнала [14].

Опытный образец мобильного измерительного прибора, использующий принципы селективной ЭГГ, состоит из аналогового RC фильтра НЧ первого порядка, дифференциального усилителя, RC фильтра ВЧ первого порядка, микроконтроллера и *bluetooth* модуля (Рис. 1) для беспроводной связи с компьютером.

Внешний вид мобильного измерительного прибора для диагностики состояния органов

ЖКТ представлен на Рис. 2. В предлагаемом образце измерительный модуль позволяет измерить медленно изменяющиеся параметры электрогастрограммы в диапазоне частот от 0,05 Гц до 3 Гц при диапазоне входных напряжений  $\pm 250$  мВ, что соответствует требованию для приборов измерения биоэлектрических потенциалов человека [14]. Данная селекция сигнала электрогастрограммы обеспечивается в двух этапах. В первом этапе с помощью простых аналоговых RC цепочек ограничивается диапазон частот входного измеряемого сигнала в пределах 0.05–10 Гц, что обеспечивает защиту от сетевых наводок, импульсных помех и выполняет функции антиалиазингового фильтра (*anti-aliasing filter*) для правильной оцифровки. Во втором этапе с помощью цифровых фильтров обеспечивается необходимая селекция полезного сигнала. Полезный сигнал, выделенный с помощью инструментального дифференциального усилителя AD620 (от *Analog Devices*, динамический диапазон подавление сифазных помех более 100 дБ) и усиленный в 10 раз, подается на вход АЦП микроконтроллера MSP430F247 (от *Texas Instruments*). Выбор данного 16-разрядного микроконтроллера с RISC архитектурой продиктован развитой периферией и сверхнизким энергопотреблением для автономного (батарейного) питания осуществляемого литий-ионным аккумулятором (*Li-ion*) 3,7 В с емкостью 1000 мАч.

Результат аналого-цифрового преобразования определяется выражением [15]:

$$N_{adc} = 4095 U_s / U_r,$$

где  $U_s$  – усиленный в 10 раз входной сигнал ЭГГ в пределах 0.2500 мВ;  $U_r$  – уровень опорного напряжения АЦП равный 2500 мВ встроенного генератора опорного напряжения;  $N_{adc}$  – число из 0000...0FFFh соответствующий текущему значению  $U_s$  ЭЭГ.

Выборка сигнала ЭГГ осуществляется 100 раз в секунду, что 5 раз больше минимальной частоты дискретизации по Найквисту (Котельникову) т.е. осуществлен оверсэмплинг (*oversampling*). Это позволило применять простые способы цифровой фильтрации, например, казуальный скользящий усредняющий фильтр низких частот и медианный фильтр для уничтожения импульсных помех.

Казуальный скользящий усредняющий (сглаживающий) фильтр низких частот реализован по следующей формуле:

$$Y(n) = [N_{adc}(n-2) + N_{adc}(n-1) + N_{adc}(n)] / 3,$$

где  $N_{adc}(n-2)$ ,  $N_{adc}(n-1)$ ,  $N_{adc}(n)$  – три последовательные выборки сигнала;  $Y(n)$  – текущий результат фильтрации сигнала (Рис.3).

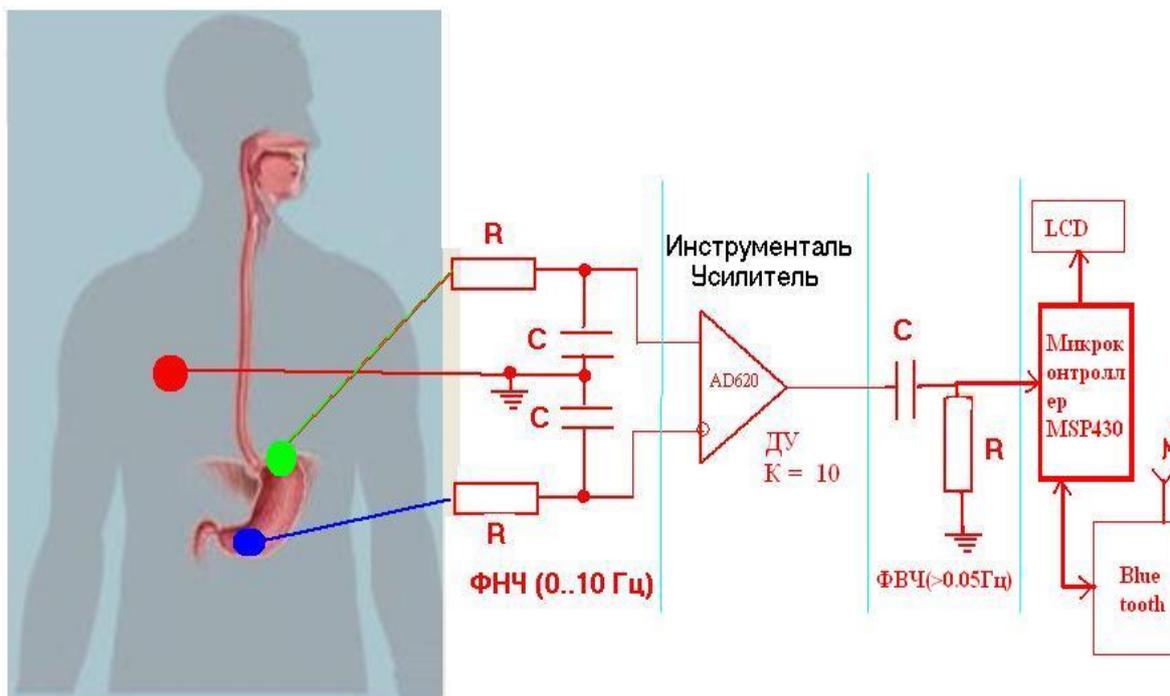


Рис. 1. Функциональная схема мобильной компьютерной системы для диагностики состояния органов ЖКТ



Рис. 2. Внешний вид мобильного измерительного прибора для диагностики состояния органов ЖКТ

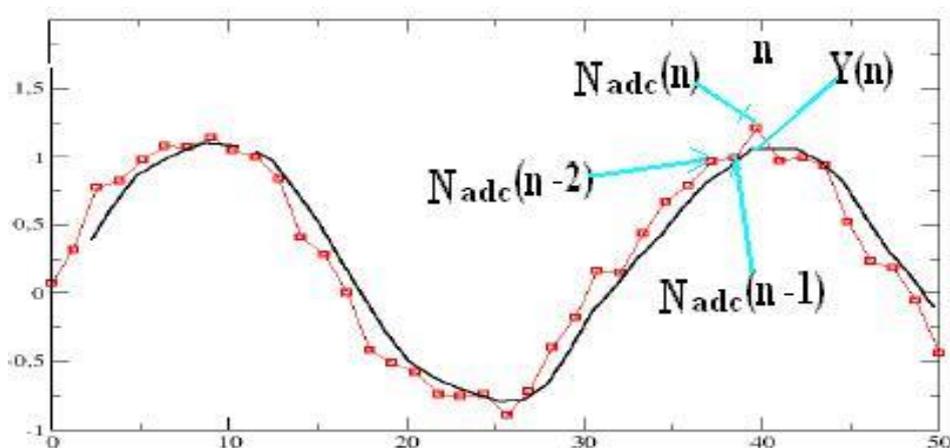


Рис. 3. Иллюстрация работы усредняющего цифрового фильтра

Передаточная функция такого фильтра имеет вид

$$H(z) = \frac{z^{-2} + z^{-1} + 1}{3}.$$

Подставим

$$z = \exp\{2j\pi f(n/F_s)\},$$

$$\begin{aligned} K(j2\pi f) &= \frac{1 + \exp\{-j2\pi f(\frac{n}{F_s})\} + \exp\{-j2\pi f(\frac{n}{F_s})\}}{3} = \\ &= \frac{\exp\{-2j\pi f(\frac{n}{F_s})\}}{3} [\exp\{j2\pi f(\frac{n}{F_s})\} + 1 + \exp\{-j2\pi f(\frac{n}{F_s})\}] = \\ &= \frac{\exp\{-2j\pi f(\frac{n}{F_s})\}}{3} [1 + 2\cos\{2\pi f(\frac{n}{F_s})\}]. \end{aligned}$$

Отсюда АЧХ определяется как модуль комплексной функции (при  $n = 1$ )

$$|K(j2\pi f)| = \frac{1}{3} [1 + 2\cos\{2\pi f(\frac{1}{F_s})\}].$$

Алгоритм работы микроконтроллера организован на основе цикла приваивания от таймера в 200 раз в секунду. В каждом цикле проверяется состояние клавиатуры и других флажков. АЦП запускается ручном режиме в каждом цикле но в двухканальном режиме. В одном канале оцифровываются сигнал ЭГГ а в другом канале состояния зарядки аккумулятора.

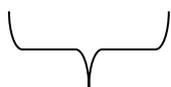
Для мониторинга качества снимаемого сигнала используется цветной ЖКД (LCD) 128 x 64 пикселей, 3 бита на пиксель.

В качестве беспроводной связи использован Bluetooth-RS232(UART) мост HC-06 модуль, что является фактически радиоудлинителем порта,

где  $2\pi f = \omega$  – циклическая частота;  $n$  – номер выборки;  $F_s$  – частота выборок в нашем случае 100 раз в секунду или 100 Гц.

Можно определить комплексную передаточную функцию этого фильтра:

все очень просто и легко интегрируется в существующие UART портов микроконтроллеров. В нашем случае модуль USC1 MSP430 установлен в режим UART [15] со скоростью 19200 бит в секунду (8N1). Отфильтрованные цифровые выборки ЭГГ сигнала в двух байтах со скоростью 10 раз в секунду через UART порт микроконтроллера пересылается Bluetooth модулю HC-06 для беспроводной передачи данных хост компьютеру. Передаются с начало старящие 4 биты потом 8 младших битов 12 разрядного кода выборки сигнала. При этом в качестве старших 4 битов первого байта передаются всегда специальный синхронизирующий код - 1010b. Таким образом, формат передаваемой кодовой последовательности: 1010xxxx xxxxxxxx.



первый байт

Краткая характеристика *Bluetooth* модуля *HC-06*:

- чип *Bluetooth* – *BC417143* производства *CSR company (Cambridge Silicon Radio)*;
- протокол связи – *Bluetooth Specification v2.0+EDR*;
- радиус действия – до 10 метров (уровень мощности 2);
- совместимость со всеми *Bluetooth*-адаптерами, которые поддерживают *SPP*;
- объем flash-памяти (для хранения прошивки и настроек) – 8 *Мбит*;
- частота радиосигнала – 2.40 .. 2.48 *ГГц*;
- хост-интерфейс – *USB 1.1/2.0* или *UART*;
- энергопотребление – ток в течение связи составляет 30-40 *мА*. Среднее значение тока около 25 *мА*.

После установки связи потребляемый ток 8 *мА*. Режим сна отсутствует. Модуль *HC-06* выполнен на базе микроконтроллера *BC417143*.

*Bluetooth*-модули могут иметь два режима работы – *master* (ведущий) и *slave* (ведомый), причём для модуля *HC-06* определённый режим уже установлен на заводе-изготовителе и меняться не может (*HC-06-S* – *slave*). *HC-06* помимо невозможности изменения режима работы, имеются всего несколько рабочих *AT*-команд: установка имени *Bluetooth*-модуля, пароля, скорости передачи данных и проверка номера версии.

## 2. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ГАСТРО-СИГНАЛОВ

Процессы в органах ЖКТ отличаются наиболее низкочастотным характером колебаний по сравнению с другими органами и нестационарностью. Широко распространённой при частотно-временном анализе гастро- и энтерограмм является локально-стационарная математическая модель гастро-сигнала, базирующаяся на дискретном кратковременном

преобразовании Фурье (КПФ), которое, в частности, позволяет исследовать в определенных пределах изменения спектральной плотности мощности и других характеристик сигналов во времени. Возможность более детальной обработки сигналов ЭГЭГ появляется с применением вейвлет-анализа, при котором базис пространства сигналов формируется путем смещений и масштабных преобразований некоторой осциллирующей функции, локализованной во времени и по частоте [7, 12].

Основными медицинскими показателями, рассчитываемыми в процессе обработки гастрограмм и энтерограмм, являются значения ДЧ в каждом из четырех каналов, пиковые значения сигналов, а также периоды затухания колебаний на величину 3 дБ. На *Рис. 4* приведены отрезки графиков электрогастрограмм здорового пациента (а) и пациента, больного острым перитонитом (б). На них наблюдается значительное различие в диапазонах амплитуд данных записей. Для того чтобы выявить информативные значения пиков колебаний сигналов, необходимо осуществлять записи в течение, по крайней мере, 15-20 минут.

На некоторых записях гастроэнтерограмм проявляются тренды, особенно четко выраженные у больных острым животом. Они могут быть описаны полиномиальными моделями невысоких порядков и определены методом наименьших квадратов [5], а затем удалены.

Спектрограммы, отображающие значения ДЧ и, возможно, боковых лепестков, определяются с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). С целью расчета состоятельных оценок спектральной плотности производится деление записей сигналов на отрезки достаточно большой длительности, после чего оценки, вычисленные на отрезках, усредняются.

Сглаживание частотных характеристик гастро- и энтерограмм осуществляется на основе спектральных окон Хэннинга [5].

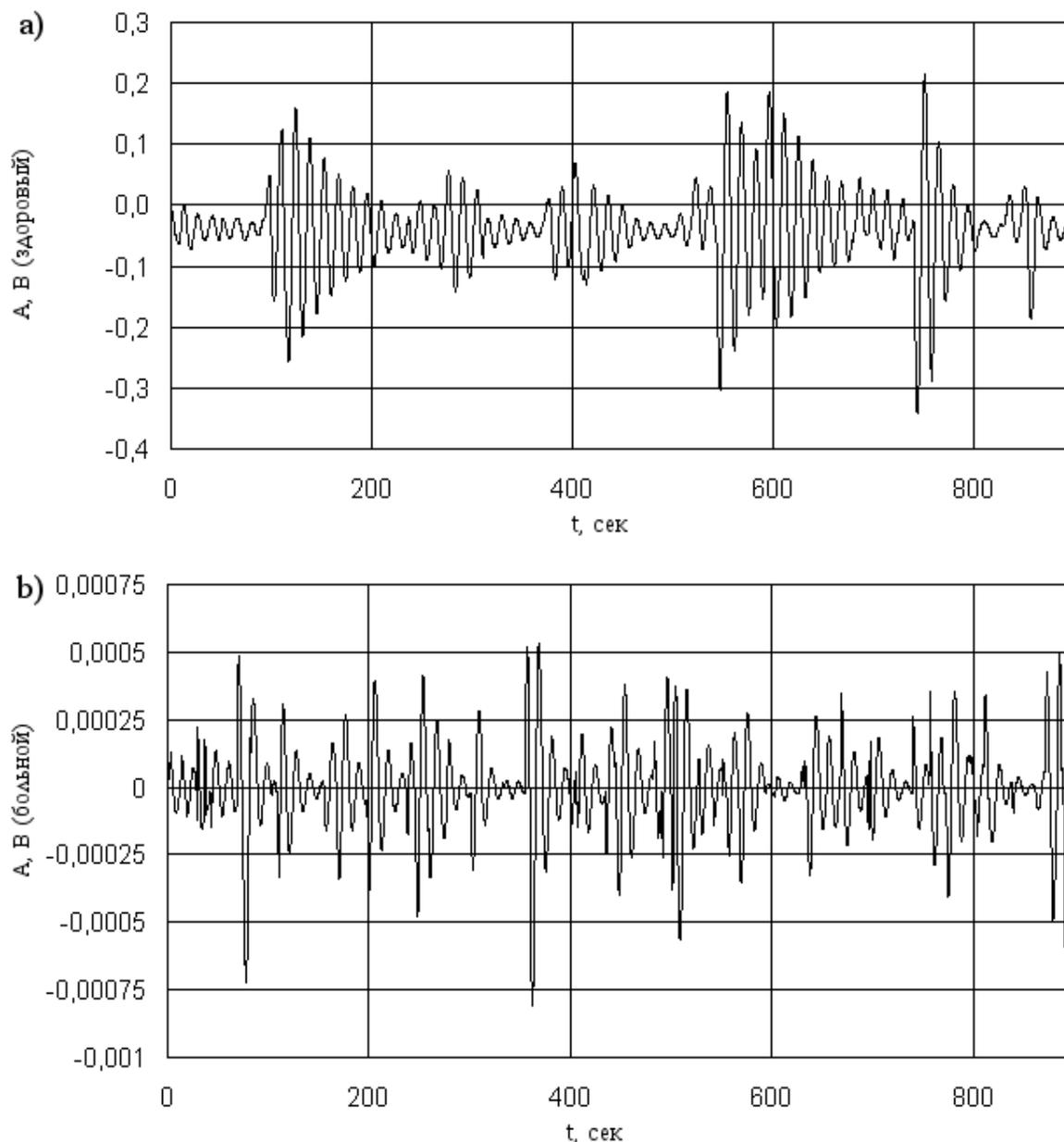


Рис. 4. Примеры электрогастрограмм

На Рис. 5. показаны графики спектральных плотностей электрогастрограмм. В данном примере значения ДЧ как у здорового, так и у больного пациента мало отличаются от номинала. Это объясняется тем, что источник острого заболевания находится в другом органе ЖКТ, а не в желудке. На спектрограмме больного пациента видны боковые составляющие.

В целом, по наблюдениям за несколькими десятками больных острым животом отклонения значений ДЧ от номинальных у них могут достигать 30%.

Мощным методом исследования нестационарных процессов, к которым относятся гастроэнтерограммы, является вейвлет-анализ сигналов [6–8]. С его помощью может быть решена задача поиска распределений пиков гастроэнтерограмм вдоль

записей любой длительности. Известно, что основными параметрами вейвлет-преобразования являются масштаб (величина, обратная частоте) и сдвиг базисной функции по временной оси. Значение вейвлет-коэффициента  $CW$  на отрезке сигнала, включающем в себя ограниченное отсчетов вокруг текущего отсчета  $x(k)$ , вычисляется по формуле

$$CW(M, s) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{i=k}^{k+s} x_i w_{i-s},$$

где  $M$  – масштаб вейвлет-преобразования,  $s$  – сдвиг базисной вейвлет-функции по отношению к текущему отсчету,  $w$  – вейвлет-функция,  $k$  – номер отсчета.

Вейвлет-преобразование выполнялось на основе базиса Хаара [6, 7]. На Рис. 4. приведены

графики зависимостей модулей вейвлет-коэффициентов от масштаба. Они показывают, что максимумы модулей наблюдаются при масштабах  $M$ , практически равных 1, т. е. при

длительностях «тестирующих» базисных функций Хаара, соответствующих периодов гастрোগрамм, равных 20 секундам (частота 0,05 Гц).

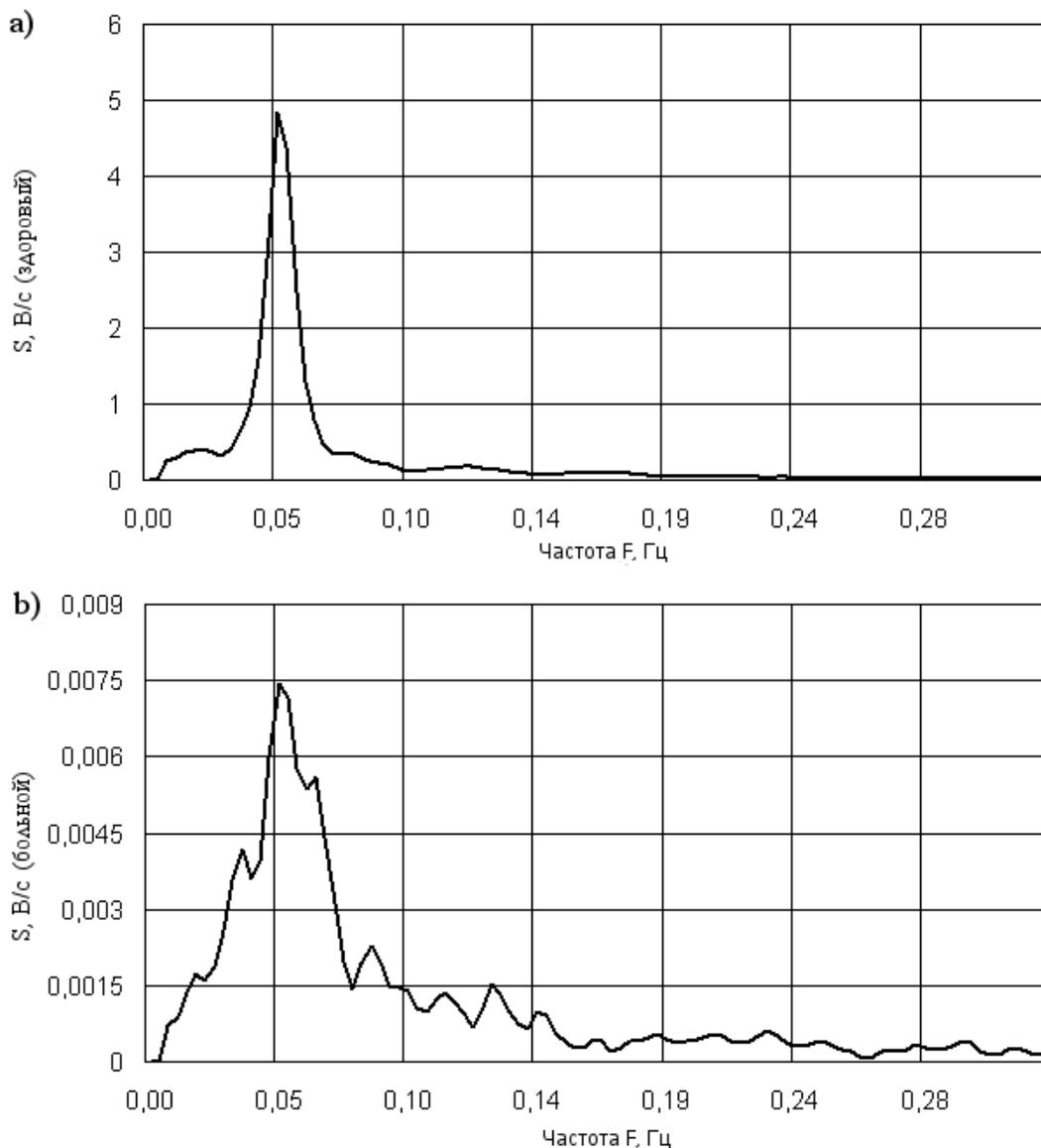


Рис. 3. Графики спектральных плотностей электрогастрограмм

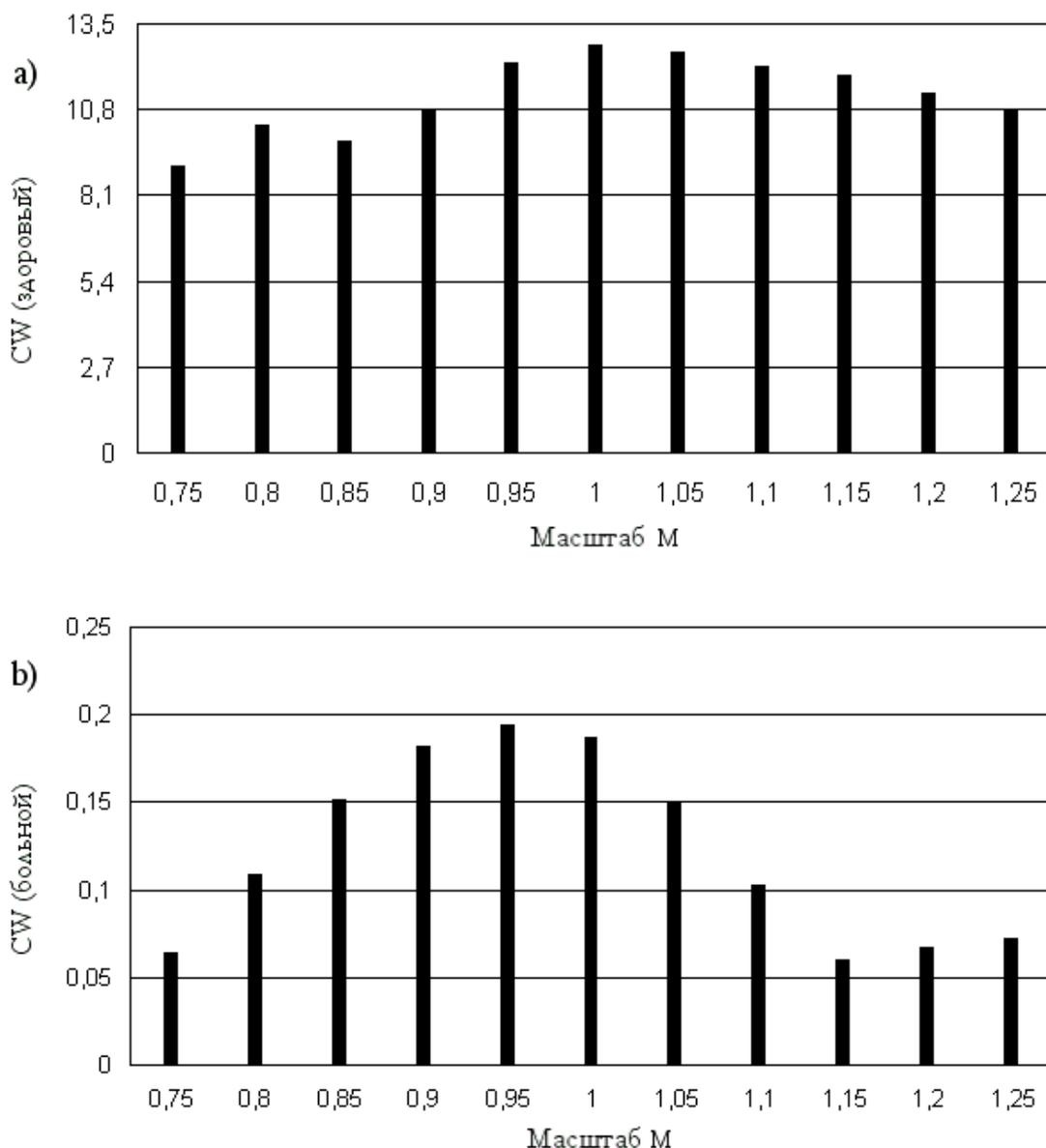


Рис. 6. Зависимости коэффициентов в базисе Хаара

### 3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Программное обеспечение системы (ПО) можно разделить на две части. Первую часть составляет подсистема ввода данных. Она разработана в среде *Visual Studio* на базе *Microsoft Foundation Classes (MFC)*. Ее функцией является организация процессов записи данных гастрোগрам и энтерограмм в локальную базу данных. В подсистеме реализована процедура визуализации процессов сбора данных.

Вторая часть ПО представляет собой пакет программ обработки данных и реализован на основе алгоритмического языка *C#*. Такой подход ускоряет обработку и позволяет не выводить на экран необязательные для конечного пользователя детали реализации. В данном случае под конечным пользователем подразумевается хирург-гастроэнтеролог.

Поясним кратко некоторые особенности функционирования программ.

Вначале выбираются данные для конкретного пациента и определенной даты обследования. Таких обследований может быть, по крайней мере, четыре: одно до операции и три после операции в течение 7–10 дней. Программа отображает графики гастрোগрам и энтерограмм по четырем каналам. В правую часть экрана выводится текстовая информация для врача-хирурга, отображающая основные параметры состояния (значение пика МПВ, доминантная частота, время затухания волны) для каждого канала. Библиотека *Qt* обеспечивает эффективное построение графического интерфейса пользователя *GUI (Graphic User Interface)*. Преимущество ее использования состоит в том, что программы могут легко переноситься от компьютера к компьютеру и использоваться в других операционных системах без модификации кода.

Из числа информативных статистических параметров, имеющих существенное значение для постановки диагноза, могут быть вычислены и построены в форме графиков распределения величин периодов затуханий волн и пиковых значений на периодах.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В описанной системе реализован новый неинвазивный метод функциональной диагностики, названный селективной электрогастрографией. Появляется возможность регистрировать и обрабатывать гастроэнтерограммы, проследить явную зависимость между характером сокращений мускулатуры органов ЖКТ и формой регистрируемых биомедицинских сигналов.

Система выполнена в компактном, беспроводном портативном виде и может размещаться на передвижном медицинском столике, что обеспечивает проведение полного обследования непосредственно у постели больного с расстояния до 100 метров. Больной может лежать в палате, а компьютер может регистрировать сигнал в коридоре. Она позволяет оценивать состояние различных органов ЖКТ и успешно контролировать процесс проводимой терапии в дооперационном и послеоперационном периодах. Методика медицинских исследований охватывает такие формы заболеваний, как язвенная болезнь, острый аппендицит, острый перитонит, дивертикулит, кишечная непроходимость и др. Так как периоды МПВ достаточно велики (их диапазон составляет от 5 до 20 сек), то для записи достаточно большого числа волн время обследования пациента должно быть не менее 15–20 минут.

Применение МИИС в клиниках для обследования и лечения пациентов позволяет технологически максимально упростить и ускорить получение объективных оценок функционального состояния ЖКТ.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Артёменко Н.М. Распознавание состояний легких человека по издаваемому ими акустическому шуму. Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Управление, вычислительная техника, информатика. Медицинское приборостроение. 2015. № 2 (15). с. 94-98.

[2] Артеменко М.В., Калугина Н.М. Диагностический анализ состояния биообъекта по хронометрическим параметрам регистрируемых сигналов. Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 4-2 (46). с. 30-35.

[3] Саблин О.А., Гриневич В.Б., Успенский Ю.П. и др. Функциональная диагностика в гастроэнтерологии. СПб.: Изд-во ВМА, 2002.

[4] Свиньин С.Ф. и др. Программно-инструментальный комплекс для функциональной диагностики в хирургической гастроэнтерологии.

Известия ВУЗов – Приборостроение. 2006. №11. С.71-74.

[5] Яковенко В.Н., Яковенко С.В., Селективный электроэнтерограф. Патент РФ № 2023419. Бюлл. Открытия, изобретения № 22, 1994.

[6] Отнес Р., Эноксон Л. Прикладной анализ временных рядов. М.: Мир, 1982.

[7] Блаттер К. Вейвлет-анализ. Основы теории. М.: Техносфера, 2006.

[8] Зайнидинов Х.Н. Методы и средства обработки сигналов в кусочно-полиномиальных базисах. Монография. Ташкент. Фан ва технология. 2014, 190 с.

[9] Zaynidinov H.N., Dannanjay Singh, Hoon Jae Lee. Piecewise-quadratic Harmut basis function and their application to problems in digital signal processing. International Journal of Communication Systems, John Wiley & Sons, Ltd. DOI: 10.1002/dac.1093, Jan. 2010. London, SCI-E. [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)

[10] Заварзин П.И., Ворновицкий Е.Г., Фельдштейн И.Г. Методы анализа временных рядов в задачах диагностики состояния ЖКТ. Ин-т матем. им. М.В.Келдыша. Препринт РАН № 30. М, 1997.

[11] Ивашкин В.Т., Лапина Т.Л. Лечение язвенной болезни: новый век – новые достижения - новые вопросы. Русский медицинский журнал. Болезни органов пищеварения. - 2002. - Т. 4. - № 1.

[12] Ступин В.А., Смирнова Г.О., Баглаенко М.В., Силюянов С.В., Закиров Д.Б. Периферическая электрогастроэнтерография в диагностике нарушений моторно-эвакуаторной функции желудочно-кишечного тракта. Лечащий врач. - 2005. № 2.

[13] С. Малла. Вейвлеты в обработке сигналов. Москва. Мир. 2005 г.

[14] Ражабов Ф.Ф., Абдурашидова К.Т. Типовые решения при построении современных электрокардиографов. Ташкент. 2018. Весник ТУИТ 2(46) С 42-55.

[15] Семейство микроконтроллеров MSP430x2xx. Архитектура, программирование, разработка приложений. Пер. с англ. Евстифеева А. В. Москва.: Додэка XXI, 2010 г.

[16] 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/

[17] 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>.

[18] V. Zhmud, L. Dimitrov, J. Nosek The History of the Application of Incomplete Integration for the Control of Laser Systems. Automatics & Software Engireery. 2018. № 3 (25). P. 48–52. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-3-2018-5.pdf>

[19] Х.Н. Зайнидинов, Ф.Ф.Ражабов Методы и алгоритмы предварительной обработки биомедицинских сигналов/ Автоматика и программная инженерия, 2018, № 4(26), С 56-60. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-4-2018-7.pdf>



**Хакимжон Насиридинович Зайнидинов** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Информационных технологий Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми.

E-mail: [tet2001@rambler.ru](mailto:tet2001@rambler.ru)

100200, Узбекистан, Ташкент, ул. Амира Темура, 108



**Фархат Фарманович Ражабов** – старший преподаватель кафедры Компьютерные системы Ташкентского университета информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми.

E-mail: [farkhad63@mail.ru](mailto:farkhad63@mail.ru)

100200, Узбекистан, Ташкент, ул. Амира Темура, 108



**Гуломидин Мингходжиевич Ходжиматов**, доктор медицинских наук, профессор, проректор по науке и инновациям Андижанского государственного медицинского института.

E-mail: [G\\_Hodjimatov@mail.ru](mailto:G_Hodjimatov@mail.ru)

100200, Узбекистан, Ташкент, ул. Амира Темура, 108

Статья получена 06.02.2019.

## Mobile Computer System for Diagnosing the State of the Organs of the Gastrointestinal Tract Based on Bluetooth Technology

H.N. Zayniddinov, F.F. Rajabov, G. M. Hodjimatov

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorezmi, Tashkent, Uzbekistan

*Abstract.* The implementation of a mobile computer system for diagnosing the state of the organs of the gastrointestinal tract (GIT) on the basis of Bluetooth technologies is considered, its algorithmic and software is described. The system is designed for computer-aided express-diagnostics of the state of the gastrointestinal organs and is characterized by non-invasive methods of examining patients, efficiency in obtaining numerical values of medical indicators, mobility and low cost. The theoretical basis of algorithms for the study of slow gastrovoln are modern methods of generalized spectral analysis of non-stationary signals.

*Key words:* diagnostics, biomedical technologies, information technologies, measurements, signal processing

### REFERENCES

- [1] Artomenko N.M. Raspoznavaniye sostoyaniy legkikh cheloveka po izdavayemomu imi akusticheskomu shumu. Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika, informatika. Meditsinskoye priborostroyeniye. 2015. № 2 (15). s. 94-98.
- [2] Artemenko M.V., Kalugina N.M. Diagnosticheskiy analiz sostoyaniya bioob'yekta po khronometricheskim parametram registriruyemykh signalov. Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal. 2016. № 4-2 (46). s. 30-35.
- [3] Sablin O.A., Grinevich V.B., Uspenskiy YU.P. i dr. Funktsional'naya diagnostika v gastroenterologii. SPb.: Izd-vo VMA, 2002.
- [4] Svin'in S.F. i dr. Programmno-instrumental'nyy kompleks dlya funktsional'noy diagnostiki v khirurgicheskoy gastroenterologii. Izvestiya VUZov – Priborostroyeniye. 2006. №11. S.71-74.
- [5] Yakovenko V.N., Yakovenko S.V., Selektivnyy elektroenterogastrograf. Patent RF № 2023419. Byull. Otkrytiya, izobreteniya № 22, 1994.
- [6] Otnes R., Enokson L. Prikladnoy analiz vremennykh ryadov. M.: Mir, 1982.
- [7] Blatter K. Veyvlet-analiz. Osnovy teorii. M.: Tekhnosfera, 2006.
- [8] Zayniddinov KH.N. Metody i sredstva obrabotki signalov v kusochno-polinomial'nykh bazisakh. Monografiya. Tashkent. Fan va tekhnologiya. 2014, 190 s.
- [9] Zayniddinov H.N., Dannanjay Singh, Hoon Jae Lee. Piecewise-quadratic Hermut basis function and their application to problems in digital signal processing. International Journal of Communication Systems, John Wiley & Sons, Ltd, DOI: 10.1002/dac.1093, Jan. 2010. London, SCI-E. [www.interscience.wiley.com](http://www.interscience.wiley.com)
- [10] Zavarzin P.I., Vornovitskiy Ye.G., Fel'dshteyn I.G. Metody analiza vremennykh ryadov v zadachakh diagnostiki sostoyaniya ZHKT. In-t matem. im. M.V.Keldysha. Preprint RAN № 30. M, 1997.
- [11] Ivashkin V.T., Lapina T.L. Lecheniye yazvennoy bolezni: novyy vek – novyye dostizheniya - novyye voprosy. Russkiy meditsinskiy zhurnal. Bolezni organov pishchevareniya. - 2002. - T. 4. - № 1.
- [12] Stupin V.A., Smirnova G.O., Baglayenko M.V., Siluyanov S.V., Zakirov D.B. Perifericheskaya elektrogastroenterografiya v diagnostike narusheniy motorno-evakuatornoy funktsii zheludochno-kishechnogo trakta. Lechashchiy vrach. - 2005. № 2.
- [13] S. Malla. Veyvlety v obrabotke signalov. Moskva. Mir. 2005 g.
- [14] Razhabov F.F., Abdurashidova K.T. Tipovyye resheniya pri postroyeniy sovremennykh elektrokardiografov. Tashkent. 2018. Vesnik TUIT 2(46) S 42-55.

- [15] Semeystvo mikrokontrollerov MSP430x2xx. Arkhitektura, programmirovaniye, razrabotka prilozheniy. Per. s angl. Yevstifeyeva A. V. Moskva.: Dodeka\_XXI, 2010 g.
- [16] 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/
- [17] 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>.
- [18] V. Zhmud, L. Dimitrov, J. Nosek The History of the Application of Incomplete Integration for the Control of Laser Systems. Automatics & Software Engireery. 2018. № 3 (25). P. 48–52. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-3-2018-5.pdf>
- [19] KH.N. Zaynidinov, F.F.Razhabov Metody i algoritmy predvaritel'noy obrabotki biomeditsinskikh signalov/ Avtomatika i programmnaya inzheneriya, 2018, № 4(26), S 56-60. <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AaSI-4-2018-7.pdf>.



**Hakimjon Nasriddinovich Zayniddinov** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Information Technologies of the Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad

al-Khorezmi.

E-mail: [tet2001@rambler.ru](mailto:tet2001@rambler.ru)

100200, Uzbekistan, Tashkent, st. Amir Temur, 108



**Farkhat Farmanovich Rajabov** – Senior Lecturer, Computer Systems Department, Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad al-Khorezmi.

E-mail: [farkhad63@mail.ru](mailto:farkhad63@mail.ru)

100200, Uzbekistan, Tashkent, st. Amir Temur, 108



**Gulomiddin Minghodjievich Hodjimatov** - Doctor of Medical Sciences, Professor, Vice-Rector for Science and Innovations, Andijan State Medical Institute.

E-mail: [G\\_Hodjimatov@mail.ru](mailto:G_Hodjimatov@mail.ru)

100200, Uzbekistan, Tashkent, st. Amir Temur, 108

The paper has been received 06.02.2019

# Результаты деформографических измерений в штольне на обсерватории Талая

Ю.Н. Фомин<sup>1</sup>, В.М. Семибаламут<sup>1</sup>, В.А. Жмудь<sup>2,3</sup>, С.В. Панов<sup>3</sup>, М.Д. Парушкин<sup>3</sup>, Л.В. Димитров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Технический университет Софии, София, Болгария

**Аннотация:** С целью выявления среднесрочных и краткосрочных предвестников землетрясений в течение года с помощью оригинального автоматизированного деформографического комплекса проведена регистрация сигналов деформаций в двух взаимно ортогональных измерительных оптических плечах. Штольневые измерения на сейсмической станции «Талая» проводились в непрерывном режиме. Кратковременные прерывания регистрации в течение лазерных деформографических наблюдений на несколько суток в основном были обусловлены отключениями электроэнергии и присутствием в штольне технического персонала во время профилактических работ. Получаемая информация поступала на обработку в г. Новосибирск по электронной почте в виде файлов с периодичностью в две недели. В работе приводятся результаты этих наблюдений.

**Ключевые слова:** измерения деформаций, лазерная техника, лазерная физика, геофизика, удаленный мониторинг

## ВВЕДЕНИЕ

В данной статье приведены данные, полученные в результате наблюдений деформаций в геофизической обсерватории «Талая», расположенной в Байкельской рифтовой зоне.

Обработка результатов деформографических наблюдений за первое полугодие 2013 года не выявила в записях деформографа каких либо особенностей, приуроченных к региональным сейсмическим событиям. Это объясняется отсутствием сильных землетрясений в ближней зоне от пункта наблюдения ( $S < 500$  км).

## 1. РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

На Рис. 1. показаны все землетрясения, произошедшие в БРЗ на расстоянии менее 500 км от станции наблюдений. По оси ординат отложено расстояние от пункта наблюдений до очага землетрясений. По оси абсцисс отложен энергетический класс землетрясений. Черными точками отмечены землетрясения, произошедшие в момент работы лазерного измерительного комплекса. Белыми точками отмечены землетрясения, произошедшие в тот момент, когда измерительный комплекс не работал.

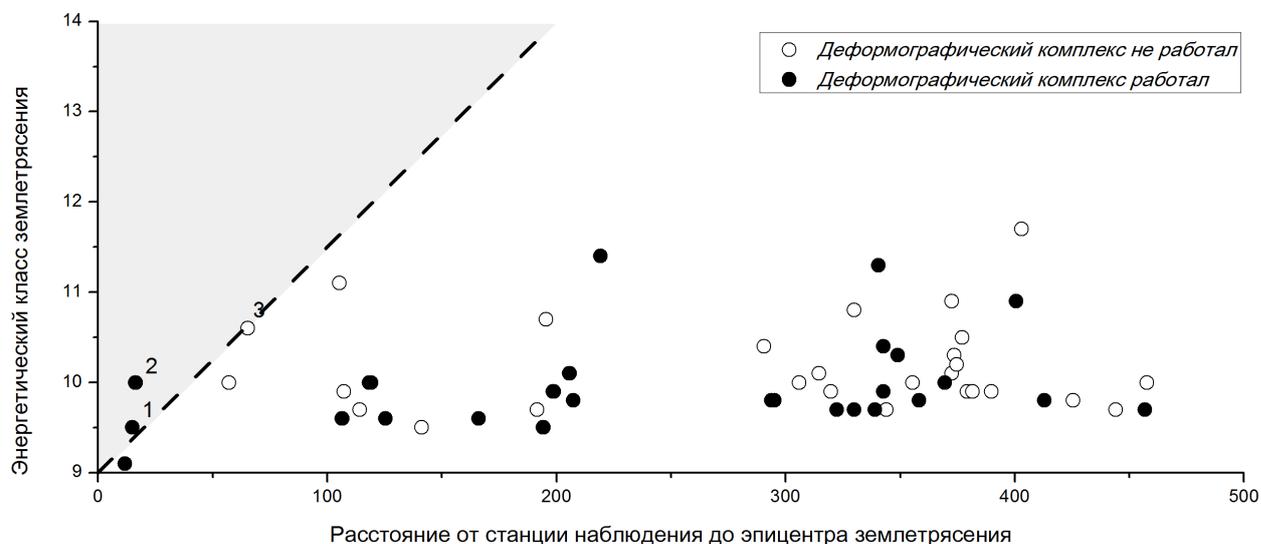


Рис. 1. Землетрясения, произошедшие в БРЗ в течение 2013 года

Пунктирной линией на рисунке отмечена эмпирически установленная для штольни «Талая» граница чувствительность деформографа к процессам сопутствующим подготовке близких землетрясений. Лазерный деформограф позволяет уверенно регистрировать особенности в поведении деформаций земной коры при подготовке землетрясений лежащих выше этой линии.

Обнаружены особенности в деформационных процессах за несколько суток до сильного землетрясения в Охотском море (Рис. 2). Землетрясение магнитудой 8.2 произошло 24 мая 2013 в 16:44 по местному времени (05:44 GMT). Эпицентр находился в акватории Охотского моря у западного побережья полуострова Камчатка, на расстоянии от пункта наблюдения 3,25 тыс. км.

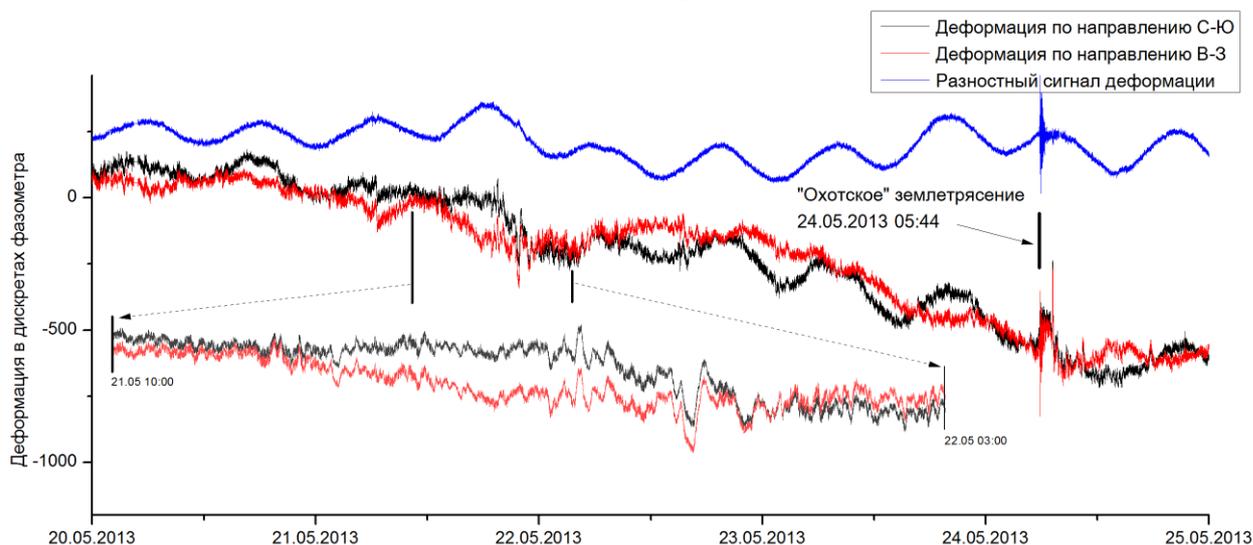


Рис. 2. Возбуждение СДПК накануне «Охотского» землетрясения 24.05.2013

Несмотря на значительное удаление от очага, в записях лазерного деформографа зарегистрирована особенность, предшествующая данному событию. За трое суток до «Охотского» землетрясения наблюдались синхронные колебания в обоих измерительных плечах деформографа. Амплитуда этих колебаний достигала величины в 1 мкм, что сопоставимо с амплитудой приливных колебаний. Отсутствие возмущений в разностном сигнале говорит об идентичности возмущений в двух ортогональных направлениях. Таким образом, можно предположить, что возмущения вызваны внутренними сдвиговыми колебаниями земли и носят общепланетарный характер.

Это не первый случай, когда удается зарегистрировать аномальное поведение деформационного сигнала накануне сильных далеких землетрясений.

Анализ данных полученных с использованием лазерного деформографа, установленного на полигоне «Талгар». В 2010 году, в рамках совместных работ Института лазерной физики СО РАН с ТОО «Физико-технический Институт» и НПК «Прогноз» ГУ «Казселезащита», на Алматинском прогностическом полигоне республики Казахстан (обсерватория «Талгар») был введен в опытную эксплуатацию усовершенствованный измерительный комплекс лазерного деформографа.

По сравнению с деформографом, установленным на сейсмической станции «Талая» БРЗ, лазерный деформограф в Талагаре имеет в 256 раз выше чувствительность к деформационным колебаниям ( $\lambda / 8192$  против  $\lambda / 32$ ) и в 200 раз большую частоту дискретизации (100 Гц против 0.5 Гц). Высокая чувствительность усовершенствованного деформографа позволила впервые обнаружить в деформационном процессе явление возбуждения колебаний в диапазон периодов 0.3–10 с. Регистрация этого явления с использованием лазерного измерительного комплекса осуществлена впервые. Нам также не известны научные публикации с описанием подобного явления.

В частности анализировалась регулярно возникающие деформационные колебания в диапазоне периодов колебаний 0.3–10 с.

Суть эффекта заключается в нелинейном возбуждении деформационных колебаний в области периодов 1.4–3.3 с. Возрастание и угасание амплитуд гармоник в спектрах происходит не равномерно. Первыми включаются гармоники с частотами 0.5–0.7 Гц, а затем подключаются гармоники с меньшей частотой, вплоть до 0.3 Гц. При этом максимум спектрального распределения колебаний постепенно смещается в низкочастотную область, а затем возвращается обратно.

В качестве иллюстрации этого эффекта, на Рис. 3 представлены спектральные протяжки сигнала сейсмического канала, полученные в 2011 году. Каждой кривой на графиках соответствует спектр, полученный на отрезке длительностью в 2 часа и сдвинутый относительно предыдущего отрезка так же на 2 часа, отсчет спектров ведется снизу вверх.

В текущем году, в ходе обработки имеющихся в наличии данных с деформографического комплекса «Талгар» удалось не только убедиться в регулярности

проявления этого эффекта, но также удалось обнаружить случаи «неполного развития» обнаруженного явления. Для примера на Рис. 4. приведена спектральная развертка данных измерительного канала деформографа. Спектры, полученные на отрезках длительностью 2 часа, расположены вдоль оси абсцисс. По оси ординат отложены частоты гармоник в Герцах. Амплитуды гармоник выделяются градацией серого цвета от белого к черному, по мере возрастания интенсивности.

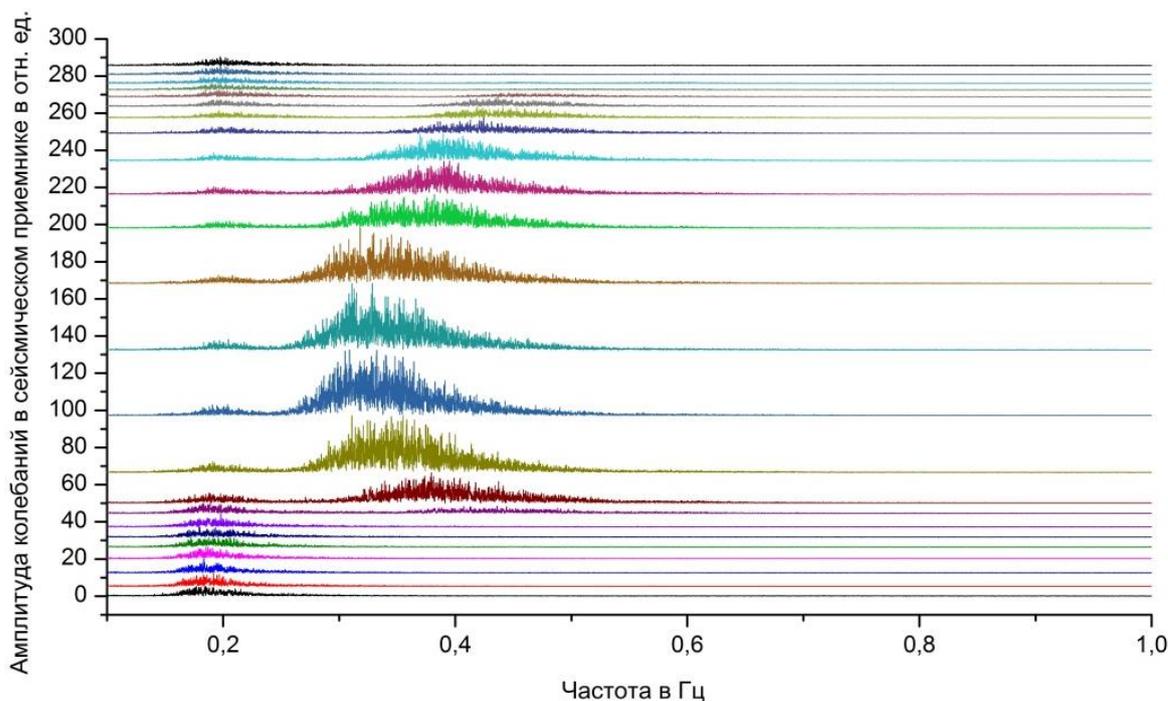


Рис. 3. Спектры сигналов сейсмического канала. Первому спектру соответствует участок 00:00 – 02:00 3.12.2010 г.

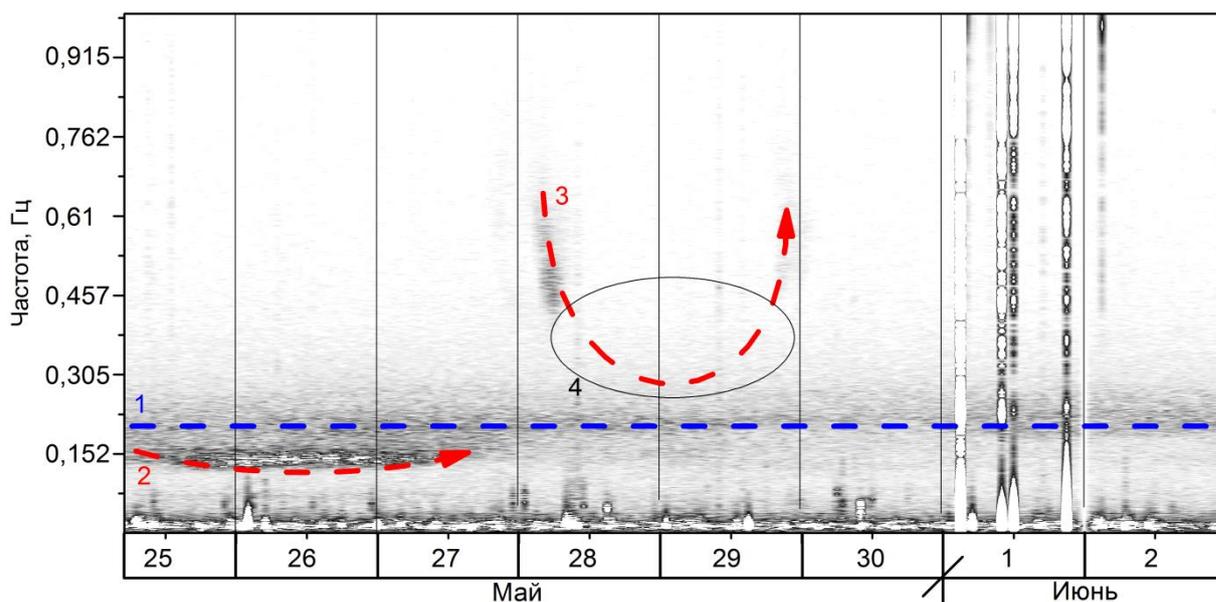


Рис. 4. Спектральная развертка сигнала одного из измерительных каналов деформографа, расположенного в штольне на полигоне «Талгар»

На рисунке пунктирной линией 1 отмечена постоянно присутствующая гармоника на частоте 0,2 Гц. Линией 2 отмечено возбуждение гармоник на частотах близких к 0,5 Гц, которое регулярно предшествует описываемому явлению. Линией 3 показано предполагаемое направление смещения максимума возбуждаемых колебаний. Однако в области отмеченной цифрой 4 возбуждаемые гармоники отсутствуют. Вопрос о том, что помешало «нормальному» развитию процесса, остается открытым и требует дальнейшего изучения.

### 1. ИЗУЧЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МНОГОЛЕТНИХ И ПРИЛИВНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Измерения деформаций по двум ортогональным направлениям проводится с помощью оригинального автоматизированного лазерного деформографа. Преимуществом созданного для измерений в штольне лазерного деформографического комплекса является то, что он обладает в присутствии атмосферы высокой относительной

чувствительностью порядка  $10^{-9} \div 10^{-10}$  к малым перемещениям в широком диапазоне периодов колебаний  $10^0 \div 10^7$  с. Он позволяет регистрировать собственные и приливные колебания Земли, детерминированные суточные вариации микродеформационного шума, а также особенности деформационных процессов в земной коре, сопровождающих сейсмичность (Рис. 5).

Одной из задач, решаемых в процессе мониторинга деформаций, это выделение явлений, отражающих сейсмический процесс. Установлено, что подготовка землетрясений, в первую очередь связана с процессами деформирования земной коры, а само сейсмическое событие – это результат внезапного высвобождения упругой энергии, накопившейся в геофизической среде в период деформации. В зависимости от силы готовящегося землетрясения, изменение хода деформационного процесса может фиксироваться на десятках или сотнях километров от очага.

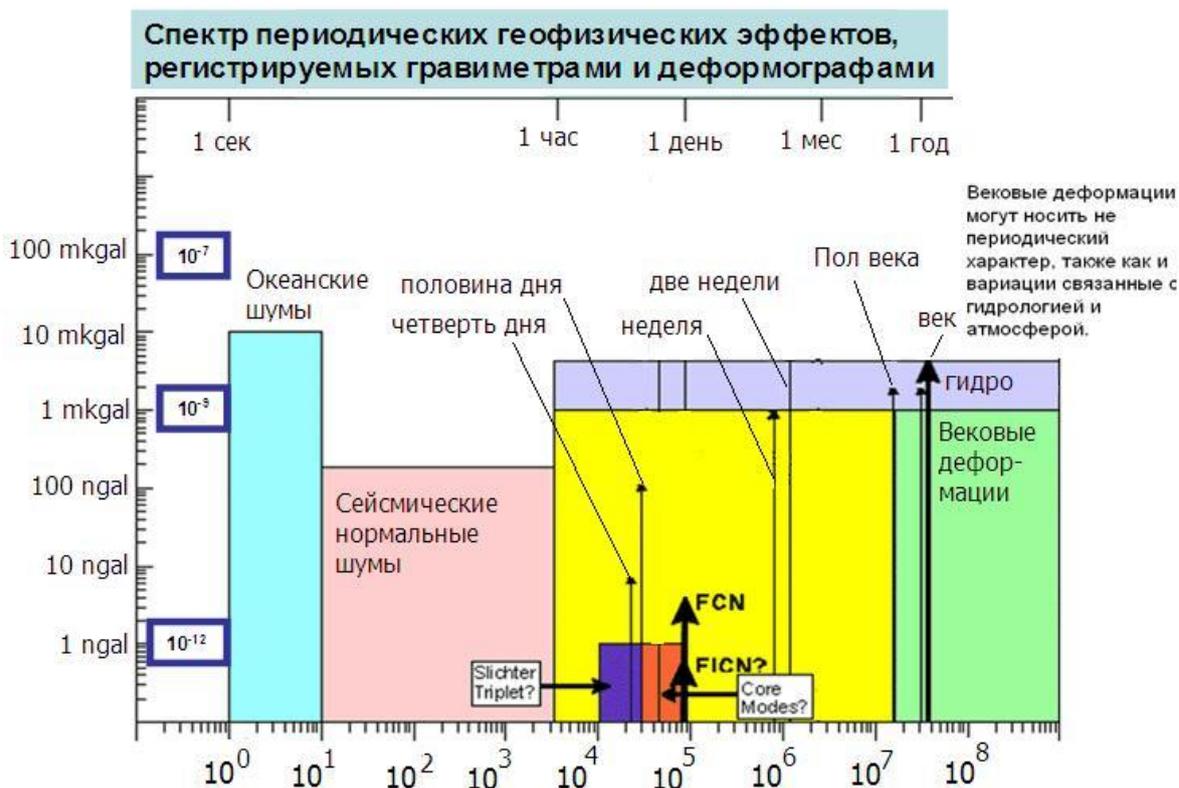


Рис. 5. Спектр периодических геофизических явлений, изучаемых с помощью современной высокоточной аппаратуры. Периоды от секунд до лет. Шкала деформаций от  $10^{-12}$  до  $10^{-6}$ . Регистрируются явления – шум океана, сейсмические нормальные моды, приливные колебания от четверть суток до годовых, теоретические моды земного ядра (периоды в несколько часов), медленные и вековые деформации связанные с землетрясениями и гидрологическими измерениями в земной коре (месяцы и годы) и, наконец, Чандлеровские колебания (430 суток). Известно, что сейши (собственные колебания уровня) озера Байкал имеют периоды от минут до 4.5 часов

На протяжении двух десятилетий с использованием двухкоординатного лазерного деформографа проводятся лазерные деформографические режимные наблюдения в штольне Байкальской рифтовой зоны, являющейся

сейсмически опасным регионом. Изучались аномалии деформационных процессов, сопровождающих региональные сейсмические события. В ходе наблюдений зарегистрировано аномальное поведение деформаци-

онного процесса накануне ряда сильных региональных землетрясений.

Одним из примеров, демонстрирующим возможности лазерного деформационного мониторинга, является регистрация развития сейсмического очага сильного ( $K > 15$ ) землетрясения, произошедшего в акватории о. Байкал (Рис. 6) 27 августа 2008 года в 01:35:31 GMT

(координаты эпицентра  $\varphi = 51.61^\circ$  и  $\lambda = 104.07^\circ$ ). Одновременное сочетание высокого энергетического класса и сравнительно малое удаление ( $S \sim 30$  км) от станции наблюдения делает это землетрясение ценным событием для получения информации в период развития его очага.

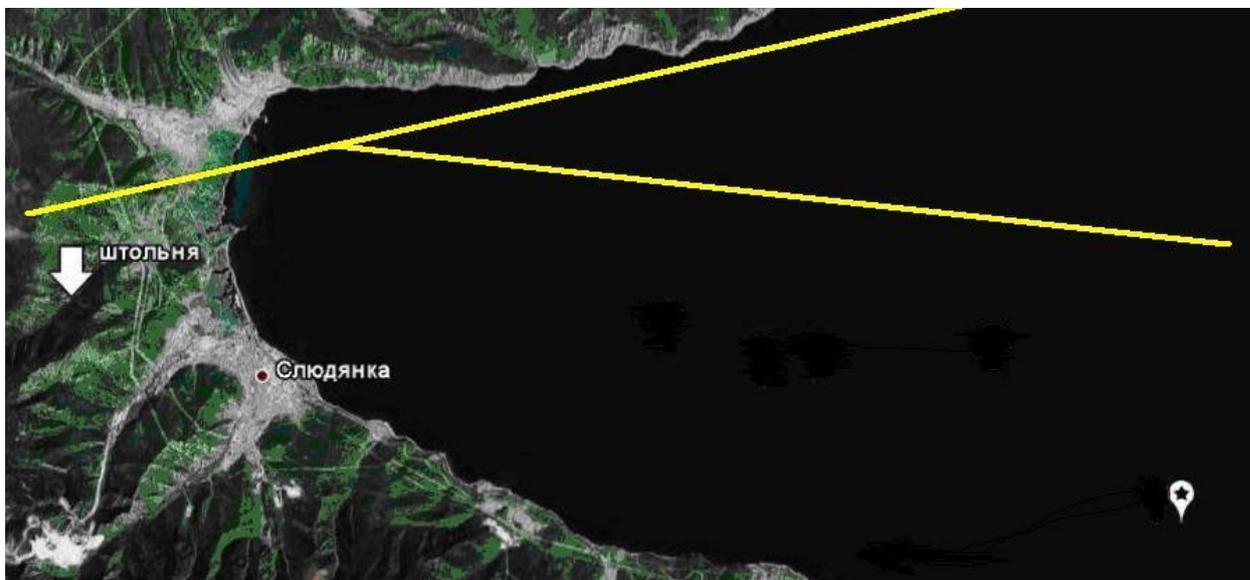


Рис. 6. Карта южной части акватории озера Байкал с указанием пункта лазерных наблюдений (штольня), сейсмического очага (27.08.2008, звездочка) и один из вариантов положения тектонических разломов

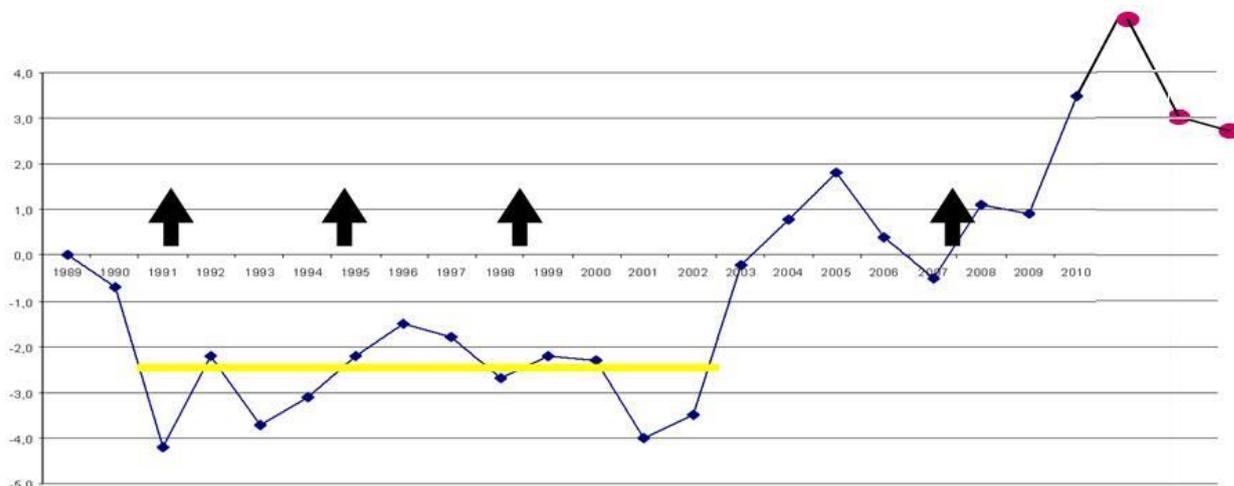


Рис. 8. Изменение объёмной деформации по ежегодным данным ( $\times 10^6$ ) в период от 1989 по 2013 г.; стрелками показаны моменты сильных региональных землетрясений (магнитуда более 6)

Первая особенность рассматриваемого сейсмического события иллюстрируется графиками деформаций, предшествующих землетрясению (Рис. 8, 9, 10). По оси ординат отложена величина сигнала в единицах объёмной деформации (безразмерная величина  $\Delta V/V$ ), положительное направление соответствует растяжению). Как следует из графиков, с девяностых годов до 2002 года выделяется период отсутствия деформаций (Рис. 7). Далее с 2003 года до момента землетрясения 2008 года и ещё несколько лет после (до 2011 года) продолжался

процесс растяжения. Отметим, что механизм очага землетрясения 27.08.2008 года соответствует состоянию растяжения (рифтогенный процесс в области байкальской впадины).

Наибольший интерес при анализе приливных колебаний представляет 12-часовая гармоника, т.к. информация, содержащаяся в этом сигнале менее зашумлена, в то время как 24-часовая приливная гармоника, как правило, искажается суточными вариациями

метеорологических параметров. Результаты приливного анализа, проведенного с помощью программы ETERNA.3.0. по ежегодным данным разностной деформаций приведены в *Таблице 1*. На *Рис. 11* и *12* приведены вариации

амплитудного фактора и фазового сдвига (отличие от нормального состояния) за период с 1995 по 2013 годы.

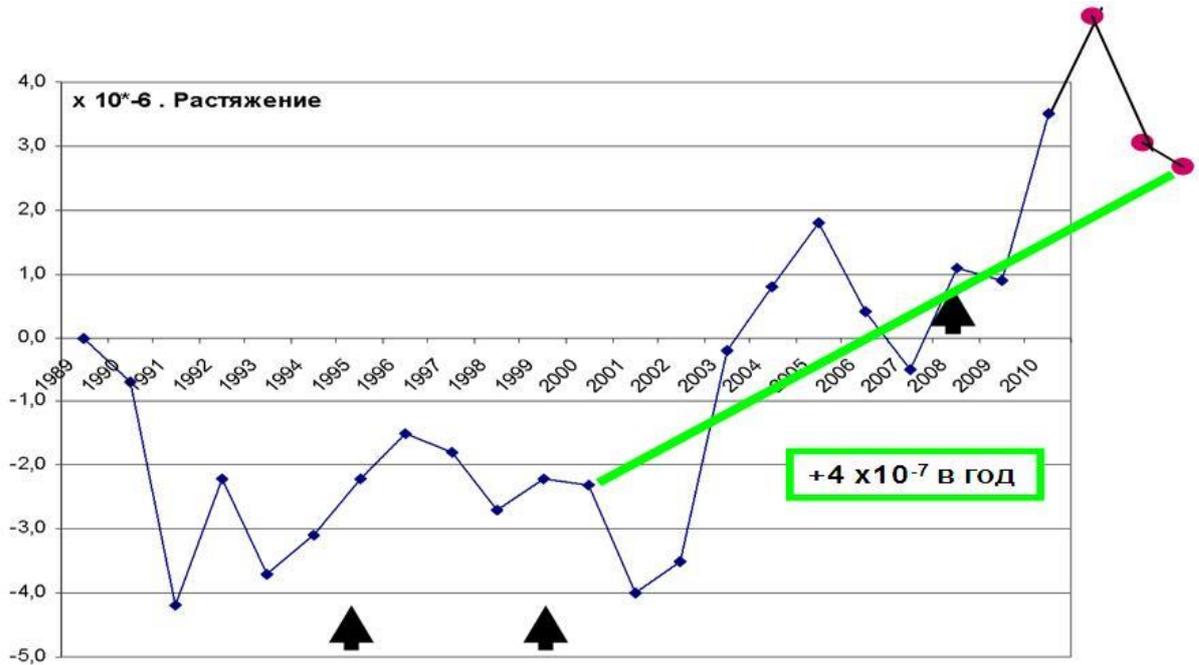


Рис. 9. Изменение объёмной деформации по ежегодным данным ( $\times 10^6$ ) в период от 1989 по 2013 г.; стрелками показаны моменты сильных региональных землетрясений (магнитуда более 6)

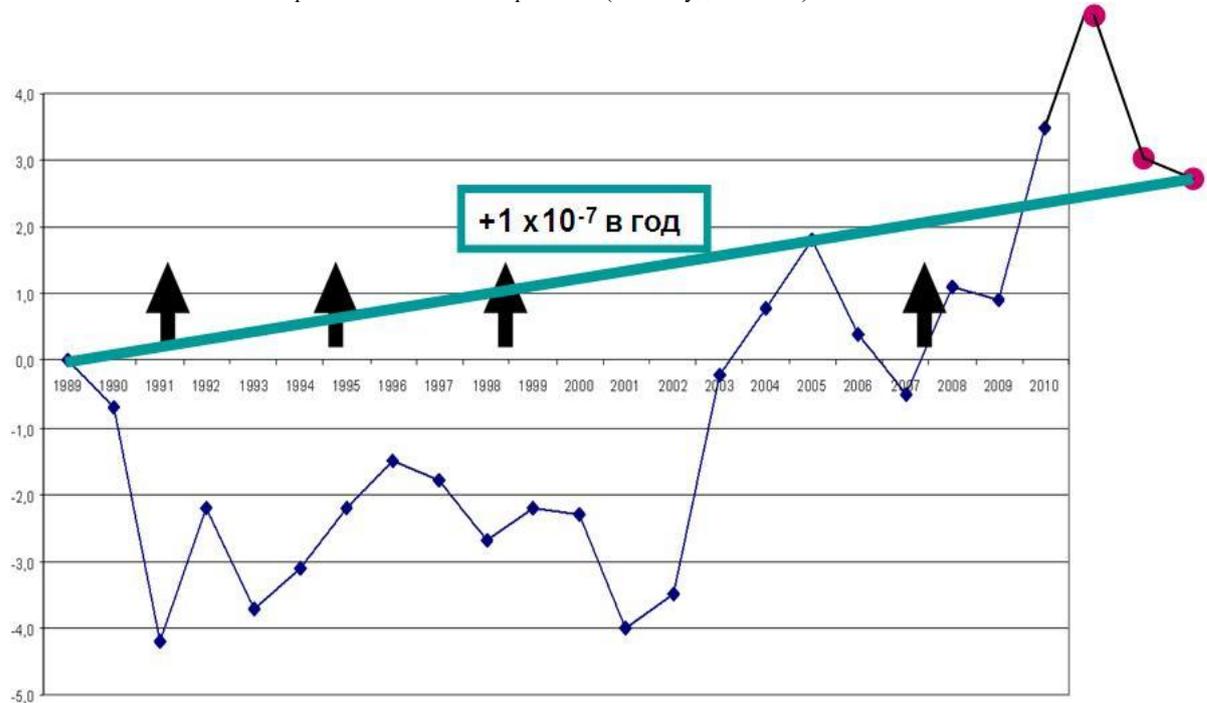


Рис. 10. Изменение объёмной деформации по ежегодным данным ( $\times 10^6$ ) в период от 1989 по 2013 г.; стрелками показаны моменты сильных региональных землетрясений (магнитуда более 6)

Результаты приливного анализа по данным за 2013 год в суточном (1) и полусуточном (2), треть (3) и четверть (4) диапазоне

Summary of observation data :								
20130101 10000...20130106220000 20130121150000...20130213 50000								
20130225 30000...20130331 0 20130331 10000...20130608 40000								
20130609180000...20130616 20000 20131106100000...20131111 30000								
20131122100000...20131216 70000 20131218120000...20131231230000								
Initial epoch for tidal force : 2013. 1. 1. 0								
Number of recorded days in total : 180.17								
TAMURA 1987 tidal potential used.								
Rigid Earth model used.								
UNITY window used for least squares adjustment.								
Numerical filter is PERTZEV 1959 with 51 coefficients.								
Estimation of noise by least squares method.								
Influence of autocorrelation not considered.								
Adjusted tidal parameters :								
from	to	wave	ampl. signal/	ampl.fac.	stdv.	phase lead	stdv.	
			[nm/s**2 ]	noise	[deg]	[deg]		
286	428	Q1	1.504	0.7	0.02598	0.03537	7.9947	2.0229
429	488	O1	63.607	32.4	0.21039	0.00650	-57.5987	0.3725
489	537	M1	13.463	7.5	0.56621	0.07519	-157.3038	4.3036
538	592	K1	73.761	42.6	0.17347	0.00407	-67.0292	0.2333
593	634	J1	0.800	0.4	0.03366	0.09094	175.3649	5.1982
635	736	OO1	4.658	1.6	0.35814	0.22815	2.8977	13.0411
737	839	2N2	5.936	4.0	0.67182	0.16952	63.3502	9.7018
840	890	N2	38.685	20.8	0.69924	0.03369	60.1628	1.9302
<b>891</b>	<b>947</b>	<b>M2</b>	<b>201.825</b>	<b>119.3</b>	<b>0.69846</b>	<b>0.00585</b>	<b>62.8854</b>	<b>0.3356</b>
948	987	L2	4.928	5.1	0.60339	0.11785	87.9328	6.7577
988	1121	S2	113.013	67.0	0.84064	0.01254	67.1854	0.7188
1122	1204	M3	1.185	0.8	0.33588	0.43487	-177.7348	24.8953
1205	1214	M4	0.622	0.4	15.59577	36.97320	116.7428	2117.0227
Standard deviation of weight unit: 75.412								
degree of freedom: 3898								

Примечание: Выделен результат по полусуточной волне M2 (нулевой фазовый соответствует величине - 65.4 градуса, анализ проводится с использованием функции «гравика» программы, т.к. вариант разностная деформации в программе отсутствует)

Материалы этого года оказались пригодными к анализу не полностью. Несколько аварий в электрохозяйстве сейсмостанции Талая повлекли за собой разъюстировку комплекса лазерного деформографа. Вариации во времени фазового запаздывания приливного сигнала, числа ШИДА и амплитудного фактора за период с 1995 по 2013 годы показаны на рисунках. Как можно судить по приведенным результатам разброс значений от среднего достигает 2 градусов в фазе и до 3% в амплитуде.

Анализ с учётом сейсмичности показывает на значимую связь хода деформаций и сейсмичности. На *Рис. 11–12* стрелками показаны периоды землетрясения с магнитудой по Рихтеру более 6, произошедшие на расстоянии до 100 км от станции Талая (85 км и 25 км). На графиках стрелками показаны моменты Бусингольского (27.12.1991, M = 6.5-7.0), Зунмурина (29.06.1995, M = 5.6-5.8), Южно-Байкальского (25.02.1999, M = 5.9-6.1) и Култукского (27.08.2008, M = 6.5). Периоды

сильных землетрясений выделяются аномальной реакцией среды на приливную силу. Приливный анализ деформаций позволил оценить величину эффектов локальных неоднородностей приразломной зоны (10% в амплитуде и  $9^\circ$  в фазе) и ориентацию системы трещин. В эпохи сильных землетрясений вариации приливных параметров достигают  $3\div 4\%$  в амплитуде и  $1\div 3^\circ$  в сдвиге фаз. Аномалии могут быть вызваны изменением гидродинамических условий в зоне глубинного разлома (в  $1\div 3$  км от пункта наблюдений) и деформированием земной коры в эпоху сильного землетрясения. Результаты измерений в штольне рассмотрены в более широком плане. Был проведен анализ поля скоростей современных движений южной части Байкальской рифтовой системы (БРС). Используя данные космической геодезии (GPS), проанализировано полученное поле деформаций (Рис. 13). При определении

деформаций на базах 10-100 км (региональный уровень) годовая скорость деформаций не превышает  $5\cdot 10^{-8}$  в год. Локальный уровень для деформаций исследовался по данным, полученным в 90 метровой штольне сейсмостанции Талая. Здесь на базах 1 м – 25 м годовая скорость деформаций достигает  $10^{-6}$  в год. Эта характеристика, видимо, является локальной. На длинных временных сериях (1985-2013 гг.) деформация носит циклический характер (периоды от 3 до 18 лет), средняя скорость деформаций становится сравнимой с определениями на больших базах. В моменты сильных региональных землетрясений локальная деформация отражает региональный характер (косейсмические изменения до  $3\cdot 10^{-6}$  в год).

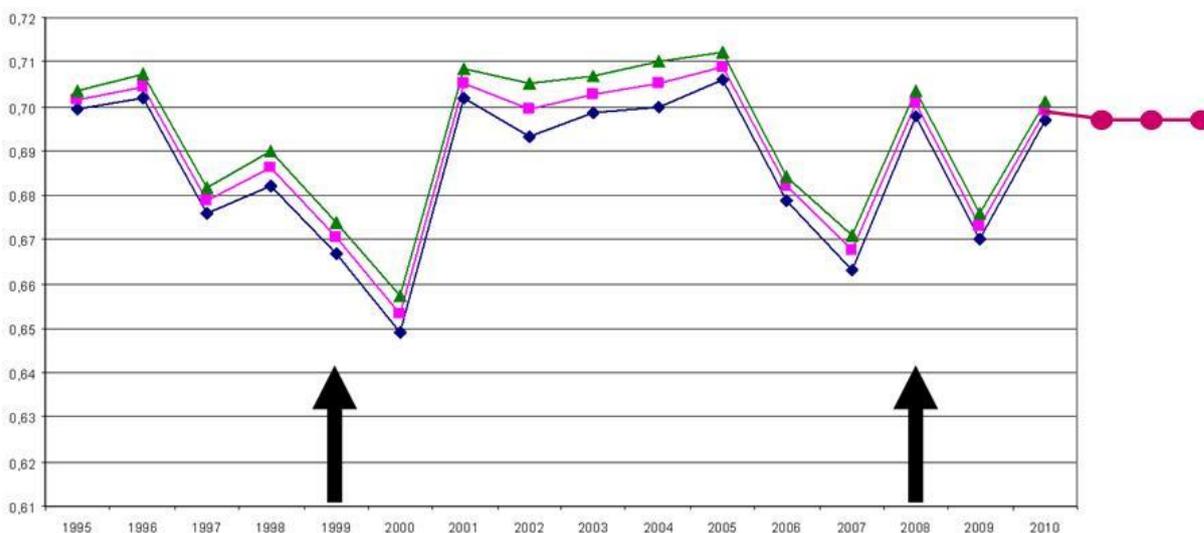


Рис. 11. Изменение амплитудного фактора разностной деформации по ежегодным данным за период с 1995 по 2013 г.

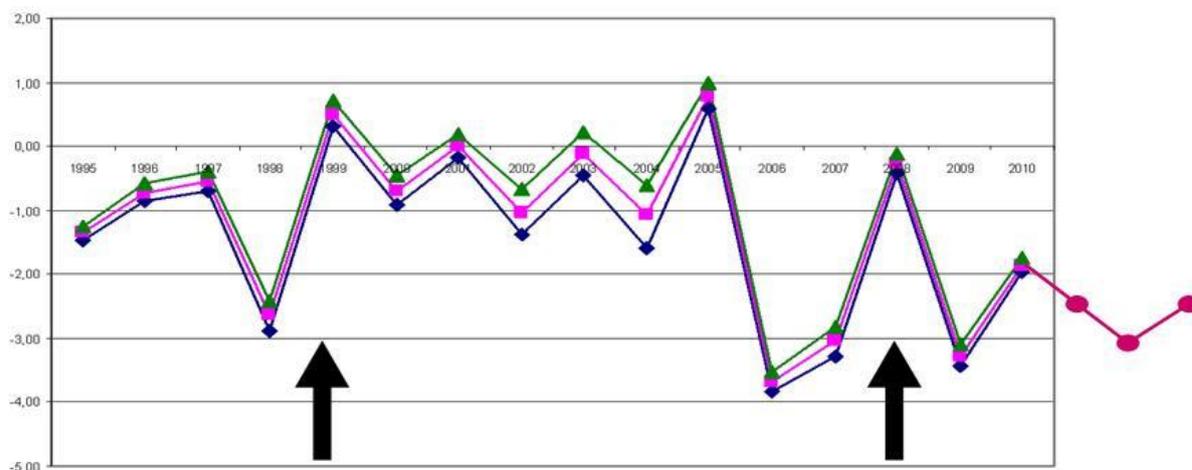


Рис. 12. Вариации фазового запаздывания разностной деформации относительно приливной силы. Стрелками показаны землетрясения 1999 и 2008 г. Период наблюдений с 1995 по 2013 гг., шкала в градусах

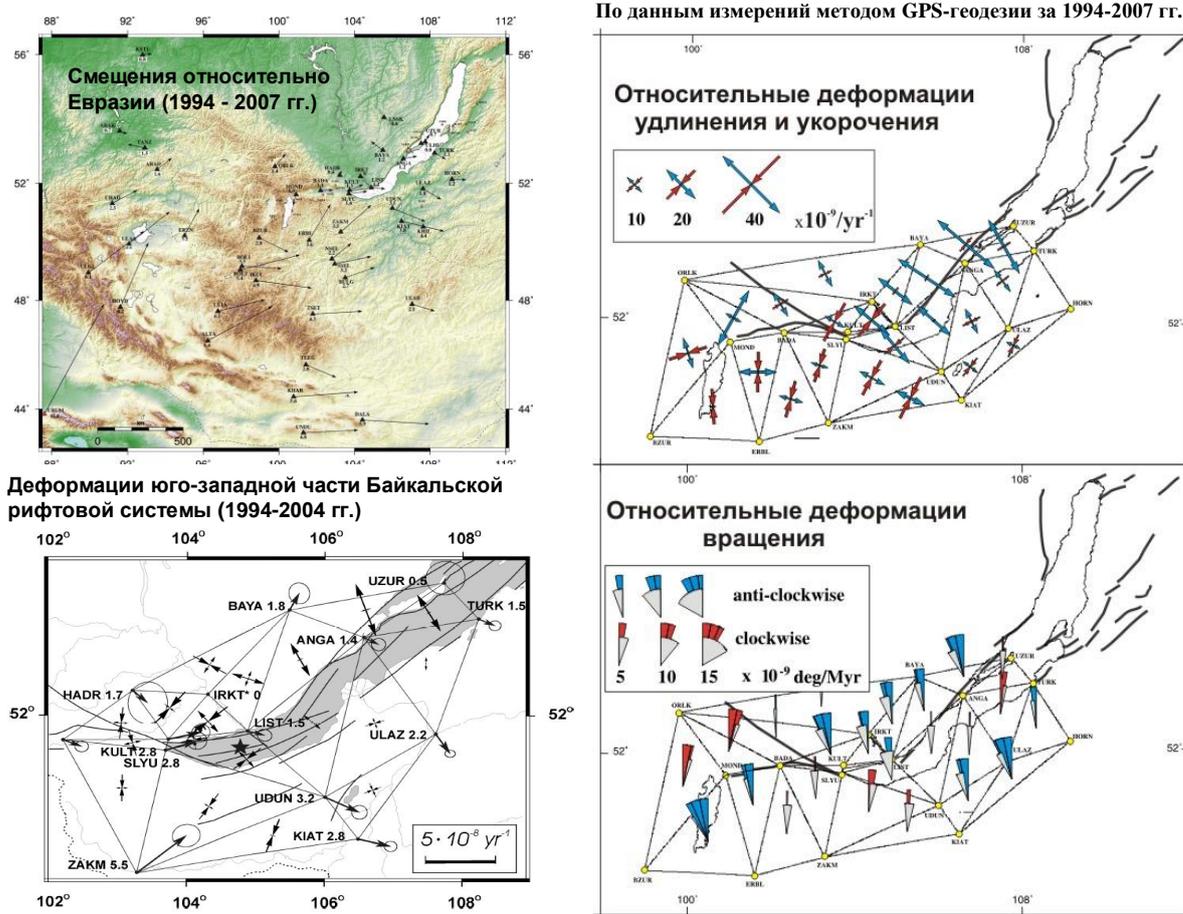


Рис. 13. Поля смещений и поля региональных деформаций по данным космической геодезии на базах от десятков до нескольких сотен километров

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье приведены результаты деформографических наблюдений с целью выявления среднесрочных и краткосрочных предвестников землетрясений в течение года с помощью оригинального автоматизированного деформографического комплекса проведена регистрация сигналов деформаций в двух взаимно ортогональных измерительных оптических плечах. Наблюдения осуществлены в штольне на сейсмической станции «Талая» в непрерывном режиме. Кратковременные прерывания регистрации в течение лазерных деформографических наблюдений на несколько суток в основном были обусловлены отключениями электроэнергии и присутствием в штольне технического персонала во время профилактических работ. Получаемая информация поступала на обработку в г. Новосибирск по электронной почте в виде файлов с периодичностью в две недели. Результаты этих наблюдений приведены в графическом виде.

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Timofeev V. Y., Ardyukov D. G., Gribanova E. I., van Ruymbekke M., Ducarme B., 2009, Tidal and long-period variations observed with tiltmeters,

extensometers and well-sensor (Baikal rift, Talaya station). Bull. Inf. Marées Terrestres, 135 p.

[2] Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin Y.N., Study of superlong-period oscillations of earth by high-sensitive laser method. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012 - Proceedings 2012. C. 16-20.

[3] S V Panov, M D Parushkin, V M Semibalamut and Yu N Fomin, Features of tidal deformations before strong distant and closely spaced regional earthquakes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 206 (2018) C. 012049.

[4] Parushkin M.D., Panov S.V., Fomin Y., Semibalamut V.M., Empirical mode decomposition method in deformation measurement data processing. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, GSSEI 2017" 2018. C.012043.

[5] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227-234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.

[6] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for

- Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491–498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [7] Жмудь В. А. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations / В. А. Жмудь, Д. О. Терешкин // Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC – 2012), P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.
- [8] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). 2003. 39(2), P. 43-47.
- [9] V. A. Zhmud, A. M. Goncharenko. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. Proc. of Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering" (APEIE–2016): Novosibirsk, Oct., 3–6, 2016: in 12 V. – V. 1, part 1. – P. 314-318. - ISBN 978-5-7782-2991-4.
- [10] 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. 45(4), P. 97-100.
- [11] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.
- [12] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [13] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [14] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P.567-574.
- [15] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. Proc. of: 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P. 615-622.
- [16] V.A. Orlov, S.V. Panov, M.D. Parushkn, Yu.N. Fomin, S.Zh. Tokmoldin, I.S. Nevmerzhtskiy, N.B. Uzbekov, D.O. Tereshkin. Spaced high-

sensitive laser deformographic observations in studying super-long period oscillations of the Earth. Proc. of the conference: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, 3 October, 2011, Novosibirsk, Vol. 1. P. 145-150.

#### Юрий Николаевич Фомин

Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СИФ ФИЦ ЕГС РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, начальник сектора, (383) 333 38 41, E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**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



**Владимир Михайлович Семибаламут** – к.ф.-м.н., директор Сибирского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия.  
E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)

#### Сергей Владимирович Панов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, старший научный сотрудник, (383) 333 30 72, E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)

#### Михаил Дмитриевич Парушкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, младший научный сотрудник, (383) 333 30 72, e-mail: [mihail.parushkin@yandex.ru](mailto:mihail.parushkin@yandex.ru)



Д.т.н. **Любомир Димитров** – Профессор, Технический университет Софии, машиностроительный факультет, Болгария. Области интереса: мехатроника, адаптивное и оптимальное управление, интеллектуальные системы диагностики и управления, MEMS.  
E-mail: [lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg)

Статья поступила 16.01.2019.

# The Results of Deformographic Measurements in the Gallery at the Talay Observatory

Yu.N. Fomin<sup>1</sup>, V.M. Semibalamut<sup>1</sup>, V.A. Zhmud<sup>2,3</sup>, S.V. Panov<sup>3</sup>, M.D. Parushkin<sup>3</sup>, L.V. Dimitrov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup> Technical University Sofia, Sofia, Bulgaria

*Abstract.* The results of observations of deformation processes in the tunnel at the “Talaya” observatory of the Baikal rift zone obtained using a laser deformograph are discussed. The study of the behavior of the deformation process in the earth's crust in a wide range of frequencies is aimed at searching for precursors of earthquakes. An excitation of oscillations with periods of 25–60 min caused by an earthquake with a magnitude of  $M = 5.2$  east of Shikotan Island was found. The averaged spectra of the main harmonics prevailing in the deformation signal of the very long period oscillations of the SDPK were obtained. A seasonal dependence of the energy of the oscillation spectra with periods of 205 and 160 minutes was found.

*Key words:* laser deformograph, earthquake precursors, Baikal rift zone, gallery deformography methods.

## REFERENCES

- [17] Timofeev V. Y., Ardyukov D. G., Gribanova E. I., van Ruymbek M., Ducarme B., 2009, Tidal and long-period variations observed with tiltmeters, extensometers and well-sensor (Baikal rift, Talaya station). *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 135 p.
- [18] Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin Y.N., Study of superlong-period oscillations of earth by high-sensitive laser method. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012 - Proceedings 2012. C. 16-20.
- [19] S V Panov, M D Parushkin, V M Semibalamut and Yu N Fomin, Features of tidal deformations before strong distant and closely spaced regional earthquakes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 206 (2018) C. 012049.
- [20] Parushkin M.D., Panov S.V., Fomin Y., Semibalamut V.M., Empirical mode decomposition method in deformation measurement data processing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. "Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, GSSEI 2017"* 2018. C.012043.
- [21] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference “Informatics, Geoinformatics and remote sensing” SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227–234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [22] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference “Informatics, Geoinformatics and remote sensing” SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491–498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [23] Жмудъ В. А. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations / В. А. Жмудъ, Д. О. Терешкин // Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC – 2012), P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.
- [24] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya)*. 2003. 39(2), P. 43-47.
- [25] V. A. Zhmud, A. M. Goncharenko. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. *Proc. of Intern. Conf. “Actual problems of electronic instrument engineering” (APEIE–2016): Novosibirsk, Oct., 3–6, 2016: in 12 V. – V. 1, part 1. – P. 314-318. - ISBN 978-5-7782-2991-4.*
- [26] Vasil'ev, V.A., Zhmud', V.A., Il'yanyovich, 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. 45(4), P. 97-100.
- [27] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.
- [28] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [29] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [30] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. *Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Jul 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P.567-574.*
- [31] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. *Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific*

Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P. 615-622.

- [32] V.A. Orlov, S.V. Panov, M.D. Parushkn, Yu.N. Fomin, S.Zh. Tokmoldin, I.S. Nevmerzhitskiy, N.B. Uzbekov, D.O. Tereshkin. Spaced high-sensitive laser deformographic observations in studying super-long period oscillations of the Earth. Proc. of the conference: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, 3 October, 2011, Novosibirsk, Vol. 1. P. 145-150.

**Yury N. Fomin**

Siberian Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences" (SIBGSRAS), Chief of Laser sector, 630090, Novosibirsk, pr. Ak. Lavrentieva 13/3, D. Sc., phone (383)333-38-41  
E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**Vadim 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



**Vladimir Semivalamut** – PhD, Director of Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: [vladim28@yandex.ru](mailto:vladim28@yandex.ru)

**Sergei V. Panov**

Institute of Laser Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences RAS, pr. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, Senior Scientific worker, phone (383)333-30-72

E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)

**Michel D. Parushkin**

Institute of Laser Physics of Siberian Branch RAS, pr. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, Scientific worker, phone (383)333-30-72.

E-mail: [mihail.parushkin@yandex.ru](mailto:mihail.parushkin@yandex.ru)



Dr. of Techn. Sci. **Lubomir Dimitrov.**

Full Professor.

Technical University of Sofia, Faculty of Mechanical Engineering, Bulgaria

Mechatronics, Adaptive and optimal control, Intelligent diagnostic and control systems, MEMS.

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

The paper was received on 16.01.2019.

# Результаты наблюдений долговременных колебаний земной коры в Байкальской рифтовой зоне

Ю.Н. Фомин<sup>1</sup>, В.А. Жмудь<sup>2,3</sup>, В.М. Семибаламут<sup>1</sup>, С.В. Панов<sup>3</sup>, М.Д. Парушкин<sup>3</sup>, Л.В. Димитров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Технический университет София, София, Болгария

*Аннотация.* Обсуждаются результаты наблюдений деформационных процессов в штольне на обсерватории «Талая» Байкальской рифтовой зоны полученных с использованием лазерного деформографа. Изучение поведения деформационного процесса в земной коре в широком диапазоне частот направлено на поиск предвестников землетрясений. Обнаружено возбуждение колебаний с периодами 25–60 мин вызванное землетрясением с магнитудой  $M = 5.2$  восточнее острова Шикотан. Получены усредненные спектры основных гармоник, преобладающих в деформационном сигнале very long period oscillations СДПК. Обнаружена сезонная зависимость энергии спектров колебаний с периодами 205 и 160 минут.

*Ключевые слова:* лазерный деформограф, предвестники землетрясений, Байкальская рифтовая зона, методы штольневой деформографии.

## ВВЕДЕНИЕ

Для регистрации динамики развития деформационных процессов в сейсмоактивных зонах необходимы устройства, позволяющие с высокой чувствительностью и в непрерывном режиме измерять малые относительные деформационные смещения горных пород. В настоящее время laser strainmeters являются наиболее чувствительными приборами, предназначенными для регистрации деформаций земной коры в широком частотном и динамическом диапазонах. Laser strainmeter позволяет регистрировать собственные и приливные колебания Земли, суточные вариации микродеформационного шума, а также особенности деформационных процессов в земной коре, сопровождающих сейсмичность.

Регистрация колебаний земной коры позволяет получать новые сведения о строении земной коры и о процессах, сопровождающих изменение напряженно-деформированного состояния горных пород. [1–8]. Проводимые исследования позволят заложить основы краткосрочного прогноза землетрясений.

Для проведения исследований деформационных процессов

Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» и Институт лазерной физики СО РАН разработали и используют лазерный деформограф для регистрации сверхмалых деформаций земной коры в двух взаимно ортогональных направлениях. Главным достоинством разработанных моделей является

то, что они позволяют проводить измерения в открытой атмосфере горных выработок без дополнительных вакуумных или лучеводов избыточного давления. Конструкция короткобазового лазерного деформографа рассчитана на длительную эксплуатацию в условиях влажной атмосферы в штольне. В данной статье сообщается о результатах проведенных исследований по материалам полученным в штольне на обсерватории «Талая» (Южный Байкал), где на протяжении более 25 лет, эксплуатируется экспериментальный образец лазерного деформографа [9–11]. Последние 15 лет наблюдения выполняются в непрерывном режиме.

Дальнейшее развитие подобной аппаратуры рассматривается в работах [12–22].

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Измерения в специализированных подземных обсерваториях с помощью laser strainmeters являются важной частью исследований кинематических характеристик земной коры. За последние 50 лет накоплен обширный материал по признакам подготовки землетрясений. Тем не менее, прогноз этих катастрофических явлений остается одной из нерешенных проблем наук о Земле. Установлено, что подготовка землетрясений, в первую очередь связана с процессами деформирования земной коры, а само сейсмическое событие – это результат внезапного высвобождения упругой энергии, накопившейся в геофизической среде в период

деформации. В зависимости от силы готовящегося землетрясения, изменение хода деформационного процесса может фиксироваться на десятках или сотнях километров от очага. Поскольку деформационные предвестники первичны по отношению к изменениям других параметров среды, наблюдающимся перед сейсмическим событием, изучение деформационных процессов широком диапазоне частот представляет значительный интерес для решения задачи прогноза землетрясений.

Создание сети наблюдательных пунктов оснащенных автоматизированными laser strainmeters в сейсмически опасных зонах позволит снизить ущерб причиняемый землетрясениями.

Длиннопериодных колебаний Земли могут иметь триггерный характер для развития различных катастрофических процессов природного и техногенного происхождения, что делает их изучения чрезвычайно важным.

## 2. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА ОБСЕРВАТОРИИ «ТАЛАЯ»

Обсерватория "Талая" расположена в юго-западной части Байкальской складчатой области. Координаты станции: 51°40'48.00"N, 103°38'24.00"E. Согласно карте сейсмического районирования это зона возможных 8-9-бальных землетрясений. Примерно в 10 км севернее станции проходит Главный Саянский разлом, а в 12 км южнее нее находятся разрывные нарушения северо-западного простирания. Благодаря использованию наблюдений над большим числом слабых толчков, получена достаточно детальная картина напряженного состояния земной коры в основной части Байкальского рифта. В подавляющем большинстве случаев обнаруживается согласованная ориентация осей напряжений.

## 3. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИСПОЛЬЗУЕМОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Двухканальный лазерный деформограф предназначен для геодинамического мониторинга напряженно-деформированного состояния горных пород и исследования деформационных колебаний в широком диапазоне частот.

Лазерный деформограф относится к интерференционным приборам. Его измерительная схема состоит из четырех независимых оптических каналов – двух измерительных, одного опорного и одного компенсирующего. Все они выполнены по схеме несимметричного интерферометра Майкельсона, с переносом фазовой информации из оптического диапазона в радиочастотный диапазон методом оптического гетеродинирования. В качестве опорного

оптического излучения, в интерферометрах используется излучение гетеродинного лазера, смещенного по частоте на 1 МГц относительно излучения измерительного лазера, посылаемого на перемещающийся объект. Входящий в состав измерителя лазерный источник оригинальной конструкции, состоит из двух He-Ne лазерных излучателей и предназначен для получения гетеродинного и измерительного излучений с разностью оптических частот равной 1 МГц, синхронизированной по фазе с частотой опорного радиогенератора с точностью 10-3 рад. при помощи электронной системы частотной фазовой автоматической подстройки. Интерферометрическая система для измерения линейных перемещений с использованием двух синхронизированных лазеров защищена патентом SU1362923.

Использование в конструкции laser strainmeters дополнительного компенсирующего плеча постоянной длины позволяет исключить влияние изменения частоты излучения лазера и изменения параметров атмосферы на результат измерений. Способ компенсации защищен патентом RU 2082085 [9–19].

Принцип работы измерительной системы основан на непрерывной регистрации изменения фазы световой волны во времени, обусловленного эффектом Доплера при отражении излучения от движущегося объекта (зеркального отражателя, укрепленного на исследуемом объекте). Величина перемещения определяется из анализа разницы фаз двух сигналов на частоте 1 МГц, поступающих на измерительные фазовые детекторы от фотоприёмника опорного плеча, фотоприемников двух измерительных плеч и фотоприемника компенсирующего плеча.

Рабочая длина волны излучения  $\lambda$  0,6328 мкм. Мощность гетеродинного и измерительного лазерных излучателей 1 мВт. Длина обоих измерительных плеч равна  $L = 25$  м. Длина компенсирующего плеча 1,2 м. Относительная чувствительность к перемещениям составляет величину  $\Delta L/L \sim 1 \times 10^{-10}$ . Запись сигналов деформографа производится с помощью компьютера с частотой дискретизации 0.5 Гц.

Преобразованные на фотоприемниках сигналы из оптического диапазона в радиочастотный с частотой 1 МГц. подаются на фазовые детекторы измеряющие величину фазового сдвига и затем, в цифровом виде, поступают на регистрирующий компьютер. Величину амплитуды и знак деформационных колебаний в измерительных плечах получают на этапе обработки данных измерений,

путём программного вычитания фазовых сигналов, зарегистрированных в цифровом виде в измерительных каналах и компенсирующем плече, с выравнивающим коэффициентом, пропорциональным отношению геометрической

длины измерительных плеч и компенсационного плеча.

Для дальнейшей обработки представляются следующие массивы данных измерений.

1. Временной ряд деформационного процесса в первом измерительном плече интерферометра.

2. Временной ряд деформационного процесса во втором измерительном плече (ортогональном первому).

3. Временной ряд процесса в компенсационном плече обусловленного флуктуациями параметров атмосферы и нестабильностью частоты излучения лазеров.

4. Временной ряд разностной деформации между первым и вторым измерительными плечами, получаемый прямым вычитанием фазовых сигналов на соответствующем измерительном фазовом детекторе.

5. Временной ряд сигнала сейсмического датчика.

Программное обеспечение является комплексом программ реального времени, обеспечивающих взаимодействие оператора с выполняемым заданием и управление ходом его выполнения. Также программа производит предварительную обработку результатов измерений и записывает их на жесткий диск с одновременной визуализацией на экране дисплея. Кроме того, программа обеспечивает просмотр данных за прошедшие сутки

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ АНАЛИЗ

Как неоднократно было установлено в ходе исследований, в деформационном процессе наблюдается ряд особенностей.

Одна из характерных представлена на *Рис. 1*.

На графиках изображен нефигурный деформационный сигнал, зарегистрированный в двух ортогональных плечах в период с 11 по 12 июля 2015. На рисунке отчетливо видно отличие в характере деформационного сигнала справа и слева. В 11:37GMT произошел резкий синхронный скачок в обоих плечах, за которым следует возбуждение колебаний с периодами 25–60 мин. Согласно каталогу землетрясений Геологической службы США (USGS) за 10 минут до этого произошло крупное землетрясение с магнитудой  $M = 5.2$  восточнее острова Шикотан ( $43.889^{\circ}N$   $148.011^{\circ}E$  глубина - 40.6 км). Несмотря на удаление в 3500 км, такое землетрясение может являться причиной возбуждения этих колебаний.

Одним из направлений исследований, является изучение деформационных long period

oscillations в диапазоне 1–5 час. С этой целью был проведен спектральный анализ рядов данных, длительностью в 30 и 60 суток, полученных за период наблюдений с 1999 по 2015 годы.

В качестве примера на *Рис. 2* приведены нефигурные записи деформационного процесса в двух измерительных каналах, их разностный сигнал, а так же вариации атмосферного давления, зарегистрированные компенсационным плечом laser strainmeters. Также на *Рис. 2* приведены данные за 1 месяц, охватывающий землетрясение (в Индии). На графиках, соответствующих деформационным данным и их разности можно увидеть момент прихода сигнала от катастрофического землетрясения, произошедшего 26 января 2001 г. в Индии, в штате Гуджарат. Оно произошло в 03:16:40 (UTC) и имело магнитуду 7.9. Несмотря на то, что оно естественным образом оказало влияние на процесс very long period oscillations в локальной временной области, это влияние носит незначительный характер при анализе спектра колебаний на протяжении всего исследуемого периода.

Для выделения основных гармоник доминирующих в деформационном сигнале в диапазоне very long period oscillations была проведена процедура усреднения спектров полученных от всех имеющихся непрерывных участков длительностью 1 и 2 месяца. Полученные усредненные спектры представлены на *Рис. 3*, где менее контрастному графику соответствует спектр от участков длительностью в 60 суток а более контрастному – 30 суток

Спектры заметно отличаются уровнем шума.

Это связано с тем, что количество непрерывных деформационных участков длительностью в 60 суток значительно меньше числа 30 суточных участков.

В обоих спектрах можно отчетливо выделить более десятка различных гармоник. Основная их часть отмечена на рисунке стрелками, над которыми написаны периоды этих гармоник в минутах.

Наиболее ярко выделяются гармоники с периодами 205 и 160 минут, что соответствует кратности звездным суткам (т.е. периоду в 24 часа) 7 и 9 соответственно. Кроме того, высоким соотношением сигнал/шум обладают так же гармоники с периодами 286, 238 и 179, с кратностью звездным суткам в 5, 6 и 8. Схожий ряд гармоник выделяются другими исследователями при анализе сейсмических шумов.

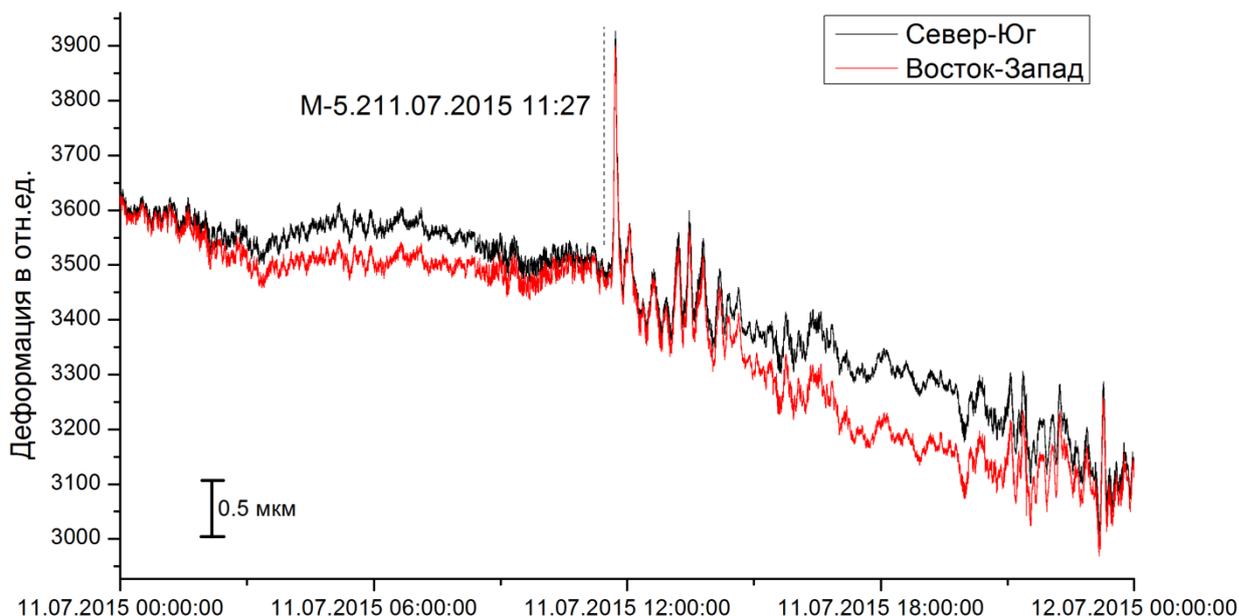


Рис. 1. Деформационный процесс, зарегистрированный в период с 11.07.2015 по 12.07.2015 г.

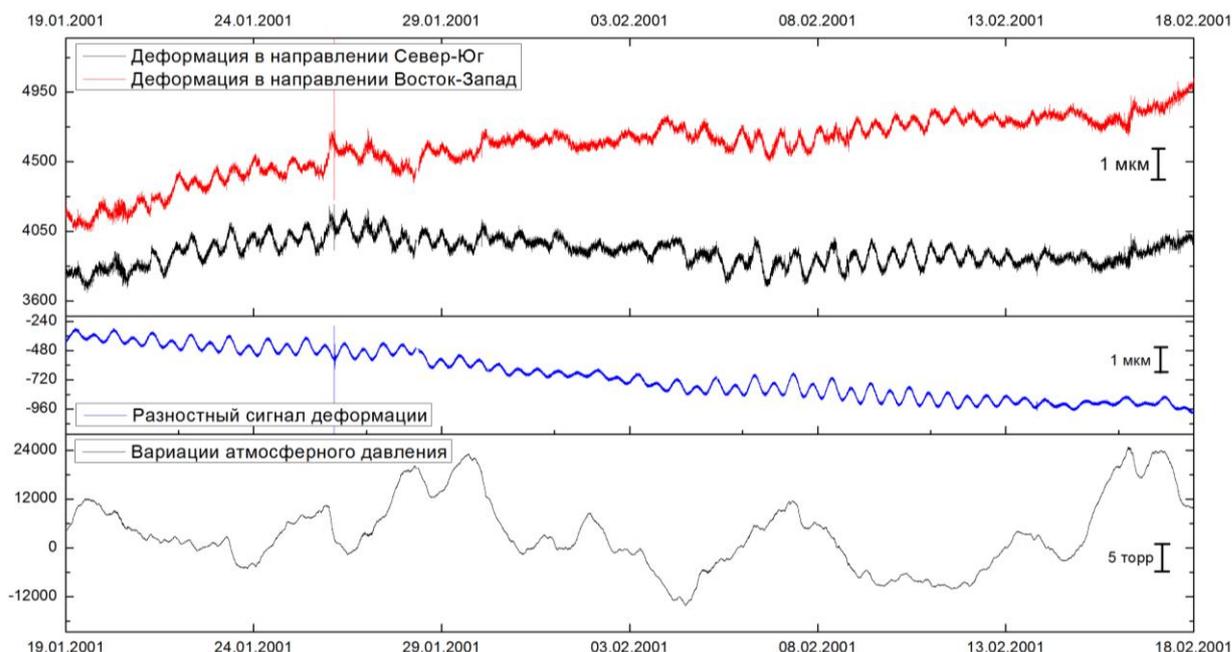


Рис. 2. Пример фрагмента деформографической записи длительностью 1 месяц

Ранее авторами установлено [23] подобие спектров деформационных сигналов зарегистрированных синхронно в разнесенных точках Земли – обсерватория «Талая» (51°40'48.00"N, 103°38'24.00"E) и обсерватория «Талгар» (43°18'N, 77°14'E). Установлено сходство между спектрами литосферных деформационных колебаний и вариаций атмосферного давления и выявлена взаимосвязь между ними.

Сопоставление спектров показано на Рис. 4. Наиболее ярко в обоих спектрах выделяются

следующие гармоники: 286, 238, 205, 196, 179, 160, 140, 125, 102, 98, 94, 82, 76. На представленном рисунке эти гармоники отмечены пунктирными линиями.

Проведено изучение поведения спектров на протяжении года в зависимости от календарного месяца наблюдения. Для этого посчитана энергия спектра для каждого из 80 выбранных непрерывных фрагментов записи длительностью в 1 месяц.

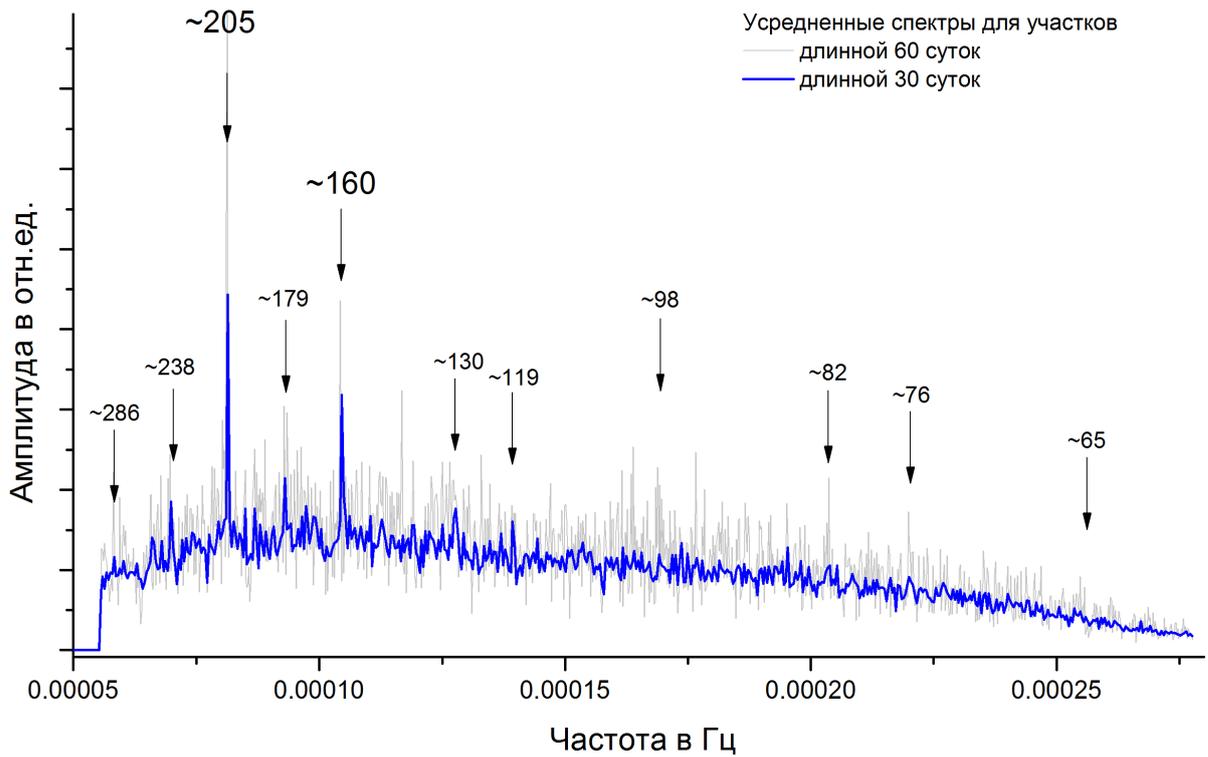


Рис. 3. Усредненные спектры деформационных колебаний

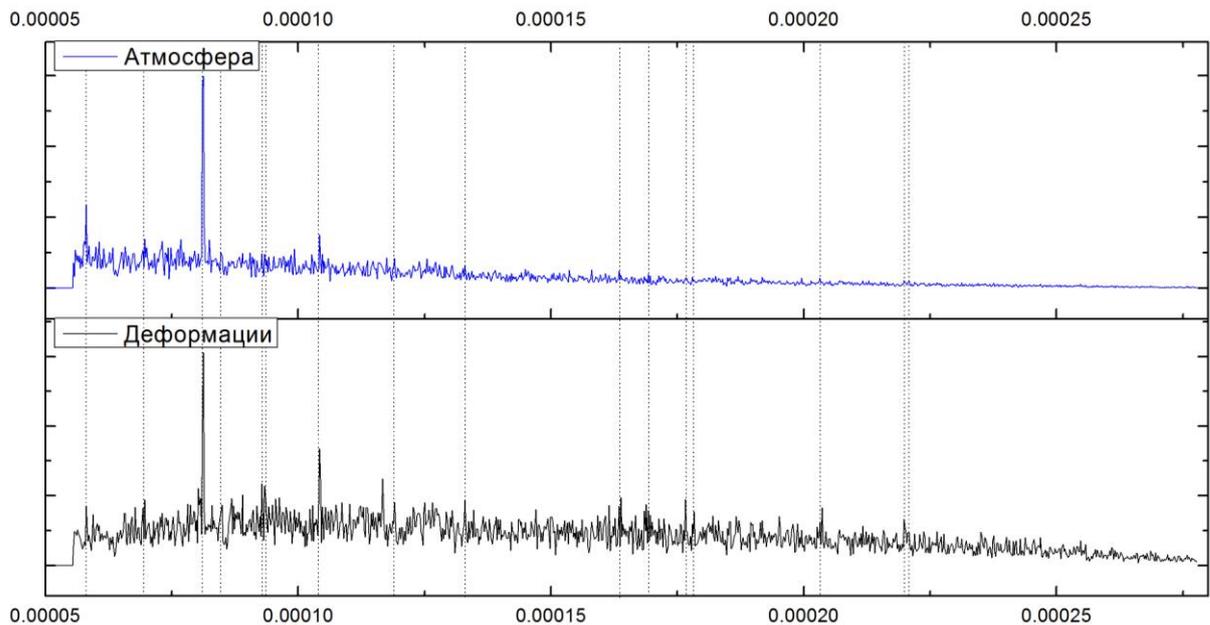


Рис. 4. Сравнение усредненных спектров атмосферных и литосферных колебаний

Полученные результаты отмечены точками в соответствующем им столбце на Рис. 5. Усредненное значение для трех соседних месяцев показано крестами, а непрерывная линия это результирующая сглаженная кривая. На графике видно, что энергия спектров

меняется в течение года в зависимости от календарного месяца, причем в летнее время она больше чем зимой, а максимум приходится на июнь-июль, т.е. изменения носят явно выраженный сезонный характер.

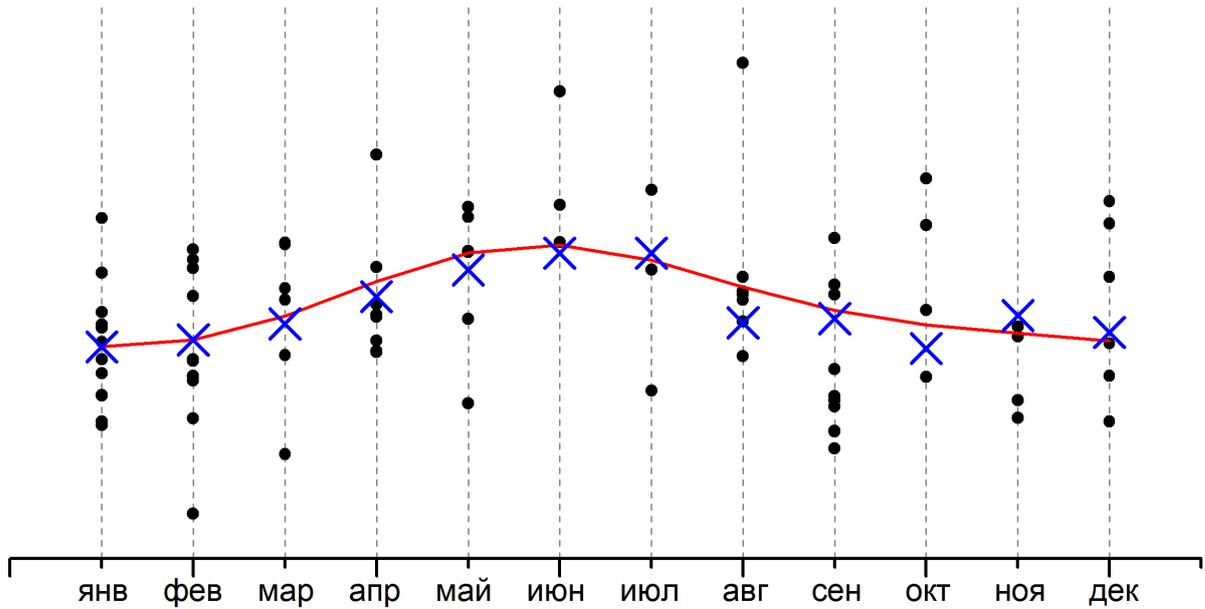


Рис. 5. Распределение энергии спектров деформационных колебаний в зависимости от календарного месяца наблюдения

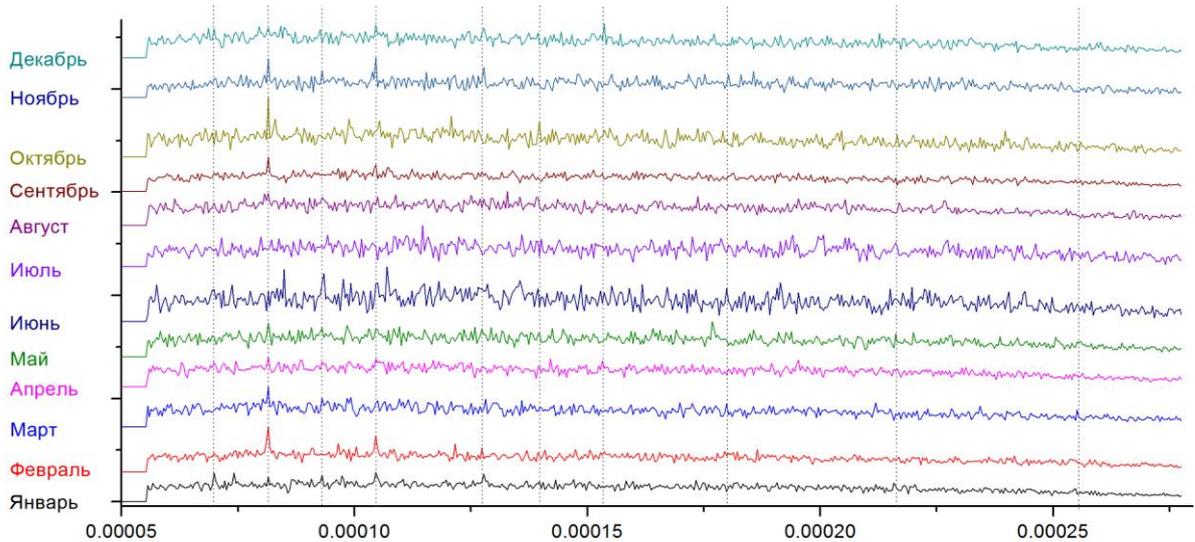


Рис. 6. Усредненные спектры деформационных колебаний в зависимости от календарного месяца наблюдения

Для того чтобы исследовать поведение конкретных гармоник в течение года, проведена процедура усреднения спектров 30 дневных фрагментов деформографических данных, зарегистрированных в различные года, но начинавшихся в один месяц. Таким образом, для каждого месяца в году получен усредненный спектр деформационных колебаний в диапазоне от 1 до 5 часов. Результирующие спектры представлены на Рис. 6. Для удобства сравнения, на этом рисунке приведена серия вертикальных прямых линий, привязанных к некоторым ярко выраженным гармоникам, явно меняющим свое поведение в зависимости от месяца усреднения. В частности гармоника с периодом 205 минут отчетливо выделяется с февраля по май и с сентября по ноябрь, в

остальное время она практически не заметна на фоне соседних гармоник. Другая яркая гармоника имеющая период в 160 минут лучше всего выделяется в период ноября по февраль.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе исследования деформационного процесса в широком диапазоне частот получены следующие результаты.

Обнаружено возбуждение колебаний с периодами 25–60 мин. обусловленная землетрясением с магнитудой  $M=5.2$  восточнее острова Шикотан ( $43.889^{\circ}N$   $148.011^{\circ}E$  глубина - 40.6 км). Проведен анализ и получены усредненные спектры основных гармоник, преобладающих в деформационном сигнале в диапазоне very long period oscillations. Наиболее

ярко выделяются гармоники с периодами 205 и 160 минут, что соответствует кратности звездным суткам.

Исследованы спектры деформационных сигналов синхронно зарегистрированных в разнесенных точках Земли – обсерватория «Талая» и обсерватория «Талгар». Получено сходство в усредненных спектрах атмосферных и литосферных колебаний. Наиболее ярко в обоих спектрах выделяются следующие гармоники: 286, 238, 205, 196, 179, 160, 140, 125, 102, 98, 94, 82, 76.

Обнаружено, что энергия спектров меняется в течение года в зависимости от месяца, причем в летний период она больше чем в зимний, а максимум приходится на июнь-июль, т.е. изменения носят явно выраженный сезонный характер. Обнаружено, что гармоника с периодом 205 минут отчетливо выделяется с февраля по май и с сентября по ноябрь. Гармоника, имеющая период 160 минут лучше всего выделяется с ноября по февраль.

Особый интерес вызывают 160 минутные колебания, поскольку механизм их возникновения не известен. Синхронная регистрация этих колебаний в разнесенных пунктах лазерных наблюдений, показала, что эти колебания носят общепланетарный характер [23]. Насколько авторам известно, этот результат с использованием laser strainmeters получен впервые.

Анализ записей лазерного деформографа, полученных после катастрофического землетрясения в Японии (11 марта 2011 года,  $M = 9.1$ ), позволил определить значения периодов собственных колебаний Земли. В спектрах выделяются частоты крутильных и сфероидальных колебаний с периодами 57 мин.; 35,5 мин.; 25,8 мин.; 20 мин.; 13,5 мин.; 11,8 мин.; 9,0 мин.; 6,1 мин.; 4,9 мин.; 4,2 мин.; 3,8 мин. и 3,6 мин. Различные частотные интервалы определяются свойствами различных областей земных недр.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Thomas Jahr, Corinna Kroner, Andrea Lippmann, Strainmeters at Moxa observatory, Germany // *Journal of Geodynamics* 41 (2006) 205–212.
- [2] Melchior P., 1983. The tides of the planet Earth, 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, 641 pp.
- [3] Dehant V, Defraigne P, Wahr J., 1999, Tides for a convective Earth. // *J. Geoph. Res.*, 104, B1, P. 1035-1058.
- [4] Ducarme B., Venedikov A. P., Arnos J., Vieira R., 2004, Determination of the long period tidal waves in the GGP superconducting gravity data. // *J. of Geodynamics*, 38, P. 307-324.
- [5] Ducarme B., Vandercoilden L., Venedikov A.P., 2006. The analysis of LP waves and polar motion effects by ETERNA and VAV methods. // *Bulletin Inf. Marées Terrestres*, 141, P. 11201-11210.
- [6] B. Ducarme, V.Yu. Timofeev, M. Everaerts, P.Y. Gornov, V.A. Parovishnii, M. van Ruymbek. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. // *Journal of Geodynamics*, v. 45, N.2-3, 2008, P.73-82.
- [7] Wenzel H.G., 1996, The nanogal software: earth tide data processing package ETERNA 3.30. // *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 124, P. 9425-9439.
- [8] Timofeev V. Y., Ardyukov D. G., Gribanova E. I., van Ruymbek M., Ducarme B., 2009, Tidal and long-period variations observed with tiltmeters, extensometers and well-sensor (Baikal rift, Talaya station). *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 135 p.
- [9] Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin Y.N., Study of superlong-period oscillations of earth by high-sensitive laser method. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012 - Proceedings 2012. C. 16-20.
- [10] S V Panov, M D Parushkin, V M Semibalamut and Yu N Fomin, Features of tidal deformations before strong distant and closely spaced regional earthquakes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 206 (2018) C. 012049.
- [11] Parushkin M.D., Panov S.V., Fomin Y., Semibalamut V.M., Empirical mode decomposition method in deformation measurement data processing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, GSSEI 2017" 2018. C.012043.
- [12] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227–234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [13] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491–498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [14] Жмудь В. А. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations / В. А. Жмудь, Д. О. Терешкин // *Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC – 2012)*, P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.
- [15] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya)*. 2003. 39(2), P. 43-47.
- [16] V. A. Zhmud, A. M. Goncharenko. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. *Proc. of Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering" (APEIE–2016): Novosibirsk, Oct., 3–6, 2016: in 12 V. – V. 1, part 1. – P. 314-318. - ISBN 978-5-7782-2991-4.*
- [17] 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. 45(4), P. 97-100.

- [18] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.
- [19] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [20] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [21] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Jul 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P.567-574.
- [22] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. Proc. of: 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Jul 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P. 615-622.
- [23] V.A. Orlov, S.V. Panov, M.D. Parushkin, Yu.N. Fomin, S.Zh. Tokmoldin, I.S. Nevmerzhijskiy, N.B. Uzbekov, D.O. Tereshkin. Spaced high-sensitive laser deformographic observations in studying super-long period oscillations of the Earth. Proc. of the conference: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, 3 October, 2011, Novosibirsk, Vol. 1. P. 145-150.

#### Юрий Николаевич Фомин

Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СИФ ФИЦ ЕГС РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, начальник сектора, (383) 333 38 41, E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**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



**Владимир Михайлович Семибаламут** – к.ф.-м.н., директор Сибирского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия.

E-mail: [vladim28@yandex.ru](mailto:vladim28@yandex.ru)

#### Сергей Владимирович Панов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, старший научный сотрудник, (383) 333 30 72, E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)

#### Михаил Дмитриевич Парушкин

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, младший научный сотрудник, (383) 333 30 72, e-mail: [mihail.parushkin@yandex.ru](mailto:mihail.parushkin@yandex.ru)



**Д.т.н. Любомир Димитров** – Профессор, Технический университет Софии, машиностроительный факультет, Болгария. Области интереса: мехатроника, адаптивное и оптимальное управление, интеллектуальные системы диагностики и управления, MEMS.  
E-mail: [lubomir\\_dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg)

Статья поступила 20.01.2019.

## Results of Observations of Long-Term Fluctuations of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone

Yu.N. Fomin<sup>1</sup>, V.A. Zhmud<sup>2,3</sup>, V.M. Semibalamut<sup>1</sup>, S.V. Panov<sup>3</sup>, M.D. Parushkin<sup>3</sup>, L.V. Dimitrov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup> Technical University Sofia, Sofia, Bulgaria

*Abstract.* The results of observations of deformation processes in the tunnel at the “Talaya” observatory of the Baikal rift zone obtained using a laser deformograph are discussed. The study of the behavior of the deformation process in the earth's crust in a wide range of frequencies is aimed at searching for precursors of earthquakes. An excitation of oscillations with

periods of 25–60 min caused by an earthquake with a magnitude of  $M = 5.2$  east of Shikotan Island was found. The averaged spectra of the main harmonics prevailing in the deformation signal of the very long period oscillations of the SDPK were obtained. A seasonal dependence of the energy of the oscillation spectra with periods of 205 and 160 minutes was found.

*Key words:* laser deformograph, earthquake precursors, Baikal rift zone, gallery deformography methods.

## REFERENCES

- [1] Thomas Jahr, Corinna Kroner, Andrea Lippmann, Strainmeters at Moxa observatory, Germany // *Journal of Geodynamics* 41 (2006) 205–212.
- [2] Melchior P., 1983. The tides of the planet Earth, 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, 641 pp.
- [3] Dehant V, Defraigne P, Wahr J., 1999, Tides for a convective Earth. // *J. Geoph. Res.*, 104, B1, P. 1035-1058.
- [4] Ducarme B., Venedikov A. P., Armoso J., Vieira R., 2004, Determination of the long period tidal waves in the GGP superconducting gravity data. // *J. of Geodynamics*, 38, P. 307-324.
- [5] Ducarme B., Vandercoilden L., Venedikov A.P., 2006. The analysis of LP waves and polar motion effects by ETERNA and VAV methods. // *Bulletin Inf. Marées Terrestres*, 141, P. 11201-11210.
- [6] B. Ducarme, V.Yu. Timofeev, M. Everaerts, P.Y. Gornov, V.A. Parovishnii, M. van Ruymbeke. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. // *Journal of Geodynamics*, v. 45, N.2-3, 2008, P.73-82.
- [7] Wenzel H.G., 1996, The nanogal software: earth tide data processing package ETERNA 3.30. // *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 124, P. 9425-9439.
- [8] Timofeev V. Y., Ardyukov D. G., Gribanova E. I., van Ruymbeke M., Ducarme B., 2009, Tidal and long-period variations observed with tiltmeters, extensometers and well-sensor (Baikal rift, Talaya station). *Bull. Inf. Marées Terrestres*, 135 p.
- [9] Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin Y.N., Study of superlong-period oscillations of earth by high-sensitive laser method. 2012 11th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering, APEIE 2012 - Proceedings 2012. C. 16-20.
- [10] S V Panov, M D Parushkin, V M Semibalamut and Yu N Fomin, Features of tidal deformations before strong distant and closely spaced regional earthquakes. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 206 (2018) C. 012049.
- [11] Parushkin M.D., Panov S.V., Fomin Y., Semibalamut V.M., Empirical mode decomposition method in deformation measurement data processing. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. "Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, GSSEI 2017" 2018. C.012043.
- [12] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227–234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [13] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491–498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [14] Жмудъ В. А. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations / B. A. Жмудъ, Д. О. Терешкин // *Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC – 2012)*, P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.
- [15] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya)*. 2003. 39(2), P. 43-47.
- [16] V. A. Zhmud, A. M. Goncharenko. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. *Proc. of Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering" (APEIE–2016): Novosibirsk, Oct., 3–6, 2016: in 12 V. – V. 1, part 1. – P. 314-318. - ISBN 978-5-7782-2991-4.*
- [17] 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. 45(4), P. 97-100.
- [18] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.
- [19] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [20] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [21] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. *Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM*. Vol. III. P.567-574.
- [22] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. *Proc. of: 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM*. Vol. III. P. 615-622.

[23] V.A. Orlov, S.V. Panov, M.D. Parushkn, Yu.N. Fomin, S.Zh. Tokmoldin, I.S. Nevmerzhitskiy, N.B. Uzbekov, D.O. Tereshkin. Spaced high-sensitive laser deformographic observations in studying super-long period oscillations of the Earth. Proc. of the conference: Geodynamics and Stress State of the Earth's Interior, 3 October, 2011, Novosibirsk, Vol. 1. P. 145-150.

**Yury N. Fomin**

Siberian Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences" (SIBGSRAS), Chief of Laser sector, 630090, Novosibirsk, pr. Ak. Lavrentieva 13/3, D. Sc., phone (383)333-38-41  
E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**Vadim 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



**Vladimir Semivalamut** – PhD, Director of Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)

**Sergei V. Panov**

Institute of Laser Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences RAS, pr. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, Senior Scientific worker, phone (383)333-30-72

E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)

**Michel D. Parushkin**

Institute of Laser Physics of Siberian Branch RAS, pr. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, Scientific worker, phone (383)333-30-72.

E-mail: [mihail.parushkin@yandex.ru](mailto:mihail.parushkin@yandex.ru)



Dr. of Techn. Sci. **Lubomir Dimitrov.**

Full Professor.

Technical University of Sofia, Faculty of Mechanical Engineering, Bulgaria

Mechatronics, Adaptive and optimal control, Intelligent diagnostic and control systems, MEMS.

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

The paper was received on 01.2019.

# Применение метода эмпирической модовой декомпозиции для обработки результатов деформографических измерений

Ю.Н. Фомин<sup>1</sup>, В.А. Жмудь<sup>2,3</sup>, В.М. Семибаламут<sup>1</sup>, Д.О. Терешкин<sup>1</sup>, С.В. Панов<sup>3</sup>, Л.В. Димитров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Технический университет Софии, София, Болгария

*Аннотация:* Проведение деформографических исследований обусловлено необходимостью восполнить недостаток информации о предвестниках землетрясений и, как следствие, отсутствием надежных методов по их прогнозу. Особенно остро этот недостаток ошутим в Прибайкалье, где недостаточная техническая оснащённость имеющихся геодинамических полигонов не позволяет достигнуть достаточно достоверных результатов по выявлению предвестников землетрясений. Создание автоматизированной высоконадёжной лазерной измерительной аппаратуры является первостепенным условием при организации сети пунктов лазерных деформографических пунктов наблюдений по выявлению ранних физических предвестников землетрясений и решения прикладных задач инженерной сейсмологии. В статье рассматривается возможность применения метода эмпирической модовой декомпозиции для обработки данных, полученных в результате использования лазерного измерителя деформаций скальных пород, который разработан Институтом лазерной физики СО РАН и применяется в обсерватории «Талая» в районе Байкальской рифтовой зоны. Приводятся результаты применения этого метода к реальным данным.

Ключевые слова: обработка информации, лазерная физика, предвестники землетрясений, точность, фильтрация

## ВВЕДЕНИЕ

Лазерные деформографы относятся к интерференционным оптическим измерителям малых перемещений. Создаваемые и эксплуатируемые СИФ ФИЦ ЕГС РАН приборы построены по схеме неравноплечего интерферометра Майкельсона с переносом фазовой информации из оптического диапазона в радиочастотный методом оптического гетеродина. Работа измерительного комплекса основана на непрерывной регистрации изменения целой и дробной частей фазы световой волны зондирующего излучения, проходящего оптический путь от измерительного блока до отражателя, укрепленного на исследуемом объекте.

Для реализации гетеродинной схемы измерения малых перемещений в создаваемых деформографах используется разработанный метод синхронизации излучений лазеров.

Главным достоинством разрабатываемых в СИФ ФИЦ ЕГС РАН лазерных деформографов является то, что для их работы не требуется применение экранировки зондирующего излучения на измерительной трассе. Это достигается благодаря использованию разработанной оригинальной методики компенсации, суть которой состоит в прямых измерениях вариаций длины волны в атмосфере с использованием короткого измерительного плеча постоянной длины (эталона).

Многолетнее использование предложенной методики показало её высокую эффективность при регистрации деформаций земной коры в условиях подземных горных выработок.

## 1. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЮЖНО-БАЙКАЛЬСКОГО ПРОГНОСТИЧЕСКОГО ПОЛИГОНА ОБСЕРВАТОРИЯ «ТАЛАЯ»

Обсерватория "Талая" расположена в юго-западной части Байкальской складчатой области. Координаты станции: 51° 40' 48.00" N, 103° 38' 24.00" E. Согласно карте сейсмического районирования это зона возможных 8-9-бальных землетрясений. Примерно в 10 км севернее станции проходит Главный Саянский разлом, а в 12 км южнее нее находятся разрывные нарушения северо-западного простирания. По данным [1] Главный Саянский разлом постепенно затухает в районе юго-западного Прибайкалья, и его зона дробления не захватывает обсерваторию Талая. Благодаря использованию наблюдений над большим числом слабых толчков, получена достаточно детальная картина напряженного состояния земной коры в основной части Байкальского рифта. В подавляющем большинстве случаев обнаруживается согласованная ориентация осей напряжений.

Участок Большая Талая (рудник №9) расположен в северной части Слюдянского

горно-промышленного района и относится к области развития глубокометаморфизированных образований, объединяемых в слюдянскую серию верхнего архея. Территория участка сложена породами верхней пачки верхней подсвиты култуковской свиты. В стратиграфическом разрезе здесь выделяются (снизу вверх):

1. Пласт мраморов мощностью не менее 50 метров.

2. Пласт сильно изменённых (диопсидизированных и скаполитизированных) амфибол-пироксеновых кристаллосланцев мощностью от 15 до 40 метров – это продуктивный горизонт, вмещающий все флогопитопроявления участка.

3. Пласт мраморов мощностью до 50 метров.

4. Пачка переслаивания мраморов, биотитовых гнейсов и амфибол-пироксеновых кристаллосланцев, она занимает крайнюю южную часть участка, мощность её – не менее 100 метров.

Метаморфические породы местами интродуцированы гранит-пегматитами в виде мелких пластовых и кососекущих жил.

Пласты и горизонты метаморфических пород образуют антиклинальную складку, обращенную выпуклостью к юго-востоку и имеющую субвертикальное положение шарнира. Углы падения слоистости и контактов пород в пределах участка преимущественно крутые: 50-90 градусов.

Главным промышленным типом обслуживания на участке являются кальцит-диопсид-флогопитовые жилы и гнезда. Длина жил, обычно первые метры, мощностью от нескольких сантиметров до 2 метров. Они залегают субвертикально и обычно поперечно к простиранию вмещающего пласта амфибол-пироксеновых кристаллосланцев. Флогопит в значительной мере гидратизирован.

Геологическая изученность участка Большая Талая довольно высокая. Геолого-разведочные работы здесь проводились в 1950-1951 годах. Продуктивный пласт с поверхности вскрыт густой сетью канав, а на глубину – тремя штольнями. На рис. 1 приведён план рудника № 9.

В 1950-1951 годах Слюдянское рудоуправление осуществляло эксплуатацию месторождения открытым способом, присвоив ему название "Рудник 9". Было задано 5 добычных карьеров. Дальнейшая эксплуатация месторождения признана нерентабельной.

В 1960 г. на месторождении проводились поисково-разведочные работы на вермикулит (гидратизированный флогопит).

Территория участка покрыта смешанным лесом. Горно-технические условия характеризуются расчленённым рельефом (крутизна склонов до 30 градусов), с редкими скальными обнажениями в пределах развития

мраморов. Породы разбиты многочисленными системами трещин. Наиболее трещиноваты гнейсы и кристаллосланцы.

Обводненность пород незначительная. Все подземные выработки находятся в практически сухом состоянии. Единственным водотоком на участке является река Талая. Дебит её не значителен (в среднем 20 л./сек.), а местами она теряет поверхностный сток. Однако не исключена вероятность селевых паводков.

## 2. ДВУХКАНАЛЬНЫЙ НЕ-НЕ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Экспериментальный He-Ne лазерный комплекс установлен в штольне на южно-байкальском прогностическом полигоне обсерватории Талая. В этой же штольне установлены наклонометры и штанговые деформографы, принадлежащие ИНГГ СО РАН, аппаратура международной службы IRIS, аппаратура БФ ФИЦ ЕГС РАН.

Оптико-механические блоки деформографа укреплены на бетонных постаментах, жестко связанных со скальным грунтом. Оптические элементы, составляющие оптическую измерительную схему, укреплены на двухкоординатных юстировочных стойках, которые, в свою очередь, крепятся болтовым соединением к плите из алюминиевого сплава. Плита установлена на бетонном постаменте и прикрепляется к нему также болтовым соединением.

Для уменьшения теплового воздействия лазерного излучателя и высоковольтного источника питания на работу оптической измерительной схемы, они установлены в боковом штреке и отделены от измерительных трасс кирпичной стенкой.

Измерительный комплекс лазерного деформографа состоит из отдельных оптико-механических и электронных блоков. Оптико-механическая часть расположена в штольне, а электронная – в производственном помещении обсерватории Талая. Обе части связаны многопроводной электрической линией.

В штольне находятся: лазерный источник излучения с источниками питания, измерительный интерферометр, включающий концевые отражатели и компенсационное оптическое плечо, сейсмический приёмник.

Электронные блоки управления лазерами и система регистрации размещены в производственном помещении сейсмостанции и включают в себя: быстродействующую систему частотно-фазовой автоподстройки лазеров, блок предварительной обработки сигнала, автоматизированную систему регистрации данных и стабилизатор напряжения питания. По многопроводной линии связи передаются электрические сигналы: управления синхронизацией излучений лазеров; от фотодетекторов измерительной схемы и сейсмоприёмника, а также поступает

напряжение питания для электронных схем предварительных усилителей фотоприемников, установленных в измерительном интерферометре.

Длина обоих измерительных плеч равна 25 м. Запись сигналов деформографа производится с помощью компьютера с частотой дискретизации 0.5 Гц. Используемая далее система цифровой обработки данных позволяет выделять и анализировать регистрируемые колебания в любом интересующем нас диапазоне периодов. Основу этой системы составляют два различных цифровых фильтра, важной особенностью которых является то, что они не изменяют фазу фильтруемых сигналов.

### 3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМЫ СБОРА ДАННЫХ

Программное обеспечение является комплексом программ реального времени, обеспечивающих взаимодействие оператора с выполняемым заданием и управление ходом его выполнения. По прерываниям от системного таймера программа производит опрос (через параллельный порт) измерителей фазового сдвига и, через плату АЦП, - сейсмического датчика и измерителя атмосферного давления; производит предварительную обработку результатов измерений; записывает их на жесткий диск с одновременной визуализацией на экране дисплея; обеспечивает просмотр данных за прошедшие сутки (для каналов, регистрирующих деформацию, возможен просмотр с компенсацией и без компенсации влияния атмосферы на деформографические данные).

### 4. ОБРАБАТЫВАЕМЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для получения информации о деформационных процессах в штольне анализируются массивы данных о вариациях фазовых сигналов, полученных от двух независимых измерительных каналов деформографа, компенсационного плеча и сейсмоприёмника при частоте опроса 0,5 Гц.

Собственно деформации в двух независимых ортогональных направлениях выделяются путём программного вычитания фазовых сигналов, зарегистрированных в цифровом виде в измерительных каналах и компенсационном плече, с выравнивающим коэффициентом, пропорциональным отношению геометрических длин измерительного и короткого плеч.

Таким образом, для дальнейшей обработки представляются следующие массивы данных деформографических измерений:

1. Временной ряд деформационного процесса в первом измерительном плече интерферометра;
2. временной ряд деформационного процесса во втором измерительном плече (ортогональном первому).

3. Временной ряд вариаций изменения параметров атмосферы в штольне и изменению частоты излучения лазеров.

4. Временной ряд разностной деформации между первым и вторым измерительными плечами, получаемый прямым вычитанием фазовых сигналов на соответствующем измерителе фазового сдвига.

5. Временной ряд сигнала сейсмического датчика.

Обработка результатов деформографических измерений методом эмпирической модовой декомпозиции.

### 5. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В процессе длительной эксплуатации деформографического комплекса был накоплен обширный экспериментальный материал, при обработке которого в основном используются наиболее распространенные и широко применяемые методы анализа геофизических и деформографических данных.

Основная проблема, связанная с применением этих классических методов заключается в том, что они главным образом, применимы к анализу линейных и стационарных систем. Тем не менее, за последние десятилетия в мировой практике был достигнут определенный прогресс в области анализа нелинейных, но стационарных и детерминированных систем, или же линейных, но при этом нестационарных (например, распределение Вигнера-Вилла, вейвлет-анализ и др.)

Однако, большинство реальных физических процессов являются одновременно и нелинейными и нестационарными. По этой причине, при анализе регистрируемых деформографических данных приходится прибегать к определенным упрощениям, в особенности по отношению к априорно устанавливаемому базису анализируемого сигнала.

### 6. ОСНОВЫ МЕТОДА ЭМПИРИЧЕСКОЙ МОДОВОЙ ДЕКОМПОЗИЦИИ

Одно из главных условий корректного представления нелинейных и нестационарных данных заключается в необходимости формирования адаптивного базиса зависящего от содержимого самих данных. Такой подход реализован в методике преобразования Гильберта-Хуанга (*HilbertHuangTransform - HHT*), которое представляет собой разложение сигнала на эмпирические моды, с последующим применением к полученным компонентам разложения преобразования Гильберта. Впервые метод эмпирической модовой декомпозиции (*EMD* – *EmpiricalModeDecomposition*) был предложен Н. Хуангом (*NASA*) в 1995 году и был адаптирован для изучения поверхностных волн тайфунов. Спустя три года метод был доработан и

обобщен для анализа произвольных временных рядов [1, 2]. Стоит отметить, что на данный момент отсутствует строгое математическое обоснование метода, однако его успешное применение в решении широкого круга практических задач позволяет надеяться на то, что в ближайшее время положение дел изменится в лучшую сторону.

Основан метод декомпозиции на предположении, что исследуемые данные представляют собой суперпозицию различных колебательных процессов (не обязательно гармонических). Каждый процесс, линейный или нелинейный, стационарный или нестационарный, представляет простое колебание, которое в определенной степени «симметрично» относительно локального среднего значения, а, следовательно, имеет экстремумы и нулевые пересечения. Такие колебательные процессы могут быть представлены функциями внутренних мод (*Intrinsic Mode Function* - *IMF*) со следующим определением:

- Число экстремумов и число нулевых пересечений функции не должно отличаться более чем на 1.

- Среднее значение между огибающими модовой функции, определенными локальными максимумами и локальными минимумами, должно быть нулевым для всех точек.

Выделяемые моды представляют собой колебательный процесс, но в отличие от гармоник, получаемых при представлении дискретного сигнала рядом Фурье, каждая *IMF* может иметь переменную амплитуду и частоту, как функции времени. Таким образом, любой произвольный сигнал можно разделить на семейство взаимно ортогональных функций внутренних мод, которые не заданы аналитически и определяются исключительно самой анализируемой последовательностью.

В общем случае, алгоритм *EMD* состоит из последовательных операций по выделению модовых функций сигнала, начиная с высокочастотных. На этапе выделения каждой новой *IMF* выполняются следующие действия.

1. Выделение всех локальных экстремумов сигнала  $y(k)$  и формирование амплитудно-координатных векторов для максимумов и минимумов.

2. При помощи выделенных локальных максимумов и минимумов естественным кубическим сплайном вычисляются верхняя и нижняя огибающие сигнала. Определяется функция средних значений  $m_1(k)$  между огибающими максимумов и минимумов.

3. Находится функция *IMF* в первом приближении, используя формулу:

$$h_1(k) = y(k) - m_1(k).$$

4. Повторив операции 1-3, заменив исходный сигнал на  $h_1(k)$ , получается второе приближение для функции *IMF*:

$$h_2(k) = h_1(k) - m_2(k).$$

5. Аналогичным образом находятся третьи и последующие приближения к модовой функции *IMF*. При этом при увеличении количества итераций функции  $h_n(k)$  и  $m_n(k)$  стремятся к своим неизменяемым формам. В качестве критерия для остановки выбирают либо предел по нормализованной квадратичной разности между двумя последовательными итерациями, либо задают максимальное число итераций (обычно выполняют 7-10 итераций, что соответствует порогу  $10^{-4}$ - $10^{-5}$ ).

6. Значение  $h_i(k)$ , полученное в ходе последней итерации принимается за первую, самую высокочастотную модовую функцию (*IMF*<sub>1</sub>)  $c_1(k) = h_i(k)$ , содержащуюся в исходном сигнале  $y(k)$ .

После вычитания полученной моды из сигнала, в нем остаются низкочастотные компоненты:

$$r_1(k) = y(k) - c_1(k).$$

При обработке полученной функции по аналогичной методике находится вторая модовая функция (*IMF*<sub>2</sub>)  $c_2(k)$ , и процесс продолжается дальше.

$$r_2(k) = r_1(k) - c_2(k).$$

В результате получается декомпозиция сигнала в  $n$ -мерном модовом эмпирическом приближении с результирующим остатком  $r_n(k)$ :

$$y(k) = \sum_{i=1}^n c_i(k) + r_n(k) /$$

Процесс декомпозиции можно продолжать вплоть до максимального «выпрямления» остатка, при котором остается только тренд сигнала с суммарным числом экстремумов не превышающих 3, из которого не представляется возможным извлечь очередную *IMF*.

В итоге получается, что исходный сигнал раскладывается по адаптивному базису, полученному из анализируемых данных. Хотя он и не определен аналитически, тем не менее, он удовлетворяет всем требованиям базиса. Т.е. он является законченным, сходящимся, ортогональным и единственным. Утверждение Хуанга о единственности разложения можно считать спорным, поскольку эмпирический процесс разложения сигнала в силу своей адаптивности в общем случае неуправляем. Даже монотональная локальная составляющая сигнала при определенном влиянии дестабилизирующих факторов (шумов, импульсных помех и т.п.) может при декомпозиции разделиться на две или три функции *IMF*. Конечно, при суммировании этих функций такая локальная составляющая может быть выделена, но это потребует от пользователя определенных априорных знаний о составе сигналов.

## 7. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА EMD ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЕФОРМОГРАФИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Не смотря на относительную новизну метода эмпирической модовой декомпозиции, он уже имеет различные модификации и широко применяется в различных областях исследований, где требуется работа с нелинейными и нестационарными данными. Внедрение методики *EMD* в процесс обработки деформографических данных показал широкий потенциал его применения, включающий выделение медленных деформационных изменений (включая монотонный тренд), выявление нестационарных возмущений в сигнале, регуляризация данных, а также очистка сигнала от высокочастотного шума вне зависимости от его характера.

Основная трудность, при реализации метода *EMD* применительно к реальным деформографическим данным, заключается в наличии пропусков в регистрируемом сигнале с длительностью от нескольких минут до нескольких суток. В чистой своей форме, метод весьма чувствителен к даже незначительным пропускам данных, это связано с особенностью получения огибающих посредством поиска локальных экстремумов и построению кубических сплайнов. При нахождении первых (высокочастотных) модовых функций локальные экстремумы в области пропусков удалены друг от друга на значительное расстояние по сравнению с соседними экстремумами, поэтому при интерполяции сплайном огибающих могут получаться значительные ложные всплески в модовой функции, которые переносятся в остаток, используемый для дальнейшей декомпозиции. На последующих шагах эффект только накапливается, что полностью приводит в негодность получаемый результат. Для выхода из сложившейся ситуации было решено добавлять в сигнал аддитивный гауссовский шум с уровнем, не превышающим 0.01-0.05 стандартного разброса исходного сигнала.

Добавление шума в исходный сигнал помимо решения проблемы с пропусками в исходном сигнале позволяет так же справиться с другой часто встречаемой проблемой – разбиение одной или несколько близко лежащих гармоник на различные соседние модовые функции. Такое поведение метода часто встречается при работе с реальными данными и в общем случае не может контролироваться в виду адаптивности базиса разложения. Для решения этой проблемы обычно либо работают не с отдельными модами, а с парами соседних, либо применяют метод *EEMD* (*Ensemble Empirical Mode Decomposition*) [3] суть которого заключается в многократной вариации

исходного сигнала путем добавления гауссовского шума, нахождении в каждом случае своих модовых функций, и их результирующим усреднении по ансамблю. В зависимости от числа реализаций варьируется уровень используемого шума, при увеличении ансамбля реализаций можно смело увеличивать и уровень шума, поскольку при усреднении величина итоговой шумовой составляющей обратно пропорциональна корню размера ансамбля. Таким образом, при усреднении ансамбля из 100 реализаций можно добавлять в сигнал гауссовский шум с уровнем порядка 25% от стандартного разброса исходного сигнала. Варьируя уровень добавляемого шума и размер ансамбля, удастся добиться решения проблемы перемешивания модовых функций. Платой за это служит значительное увеличение машинного времени необходимого для обработки сигналов.

Результат выделения медленной составляющей деформационного процесса при помощи метода *EMD* модифицированного для работы с реальными деформографическими данными представлен на *Рис. 1, а*. Верхней кривой на графике соответствует не фильтрованный деформационный сигнал длительностью 85 сут., зарегистрированный в одном из измерительных плеч деформографа, расположенного в штольне сейсмостанции «Талая». Нижняя кривая на графике, помеченная цифрой 3, является результатом работы низкочастотного фурье-фильтра с частотой среза  $\sim 0.6$  1/сут., по кривой можно судить о том, что такой подход обеспечивает достаточно хорошее выделение медленной составляющей деформационного процесса, но только в центральной области графика. По краям присутствуют, т.н. «краевые» эффекты длительностью порядка 10-12 суток искажающие выделяемый сигнал. Применение метода эмпирической модовой декомпозиции позволяет снять тренд и медленную составляющую на всей длине сигнала. Для получения этой кривой было произведено суммирование трех последних модовых функций и результирующего остатка декомпозиции. Эти четыре функции представлены на нижней части *Рис. 1, б*.

Проанализировав моды  $IMF_{11}$ - $IMF_{13}$  и результирующий остаток  $R$ , можно сделать вывод, что помимо монотонного сезонного дрейфа (деформационное сжатие плеча) наблюдается постепенная раскочка низкочастотных компонент сигнала. Причина такого поведения требует дополнительного анализа, на данном этапе стоит просто обратить внимание на факт возможности выявления подобного поведения деформации.

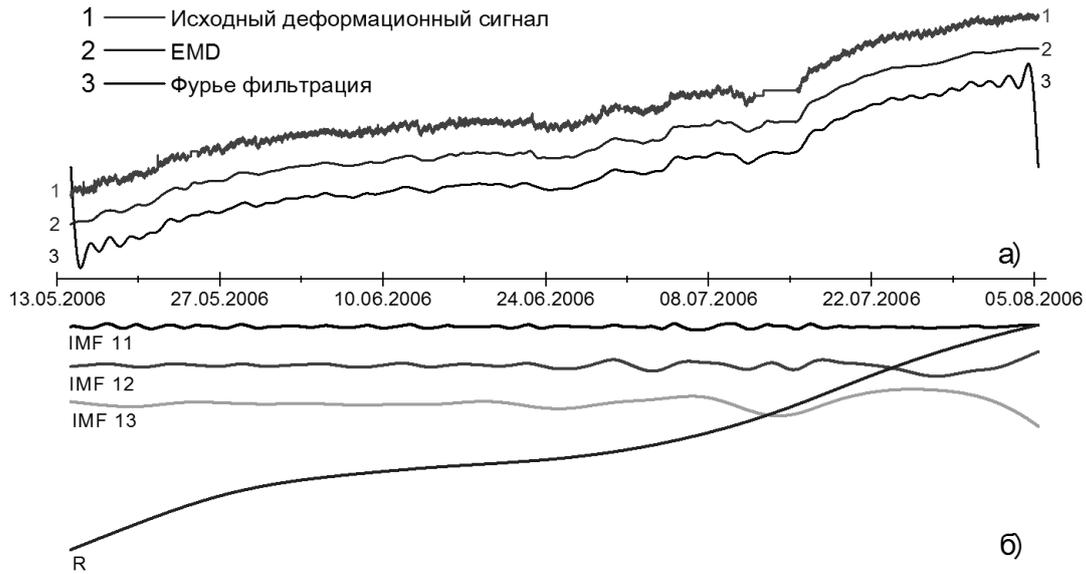


Рис. 1. Результаты выделения медленной составляющей деформационного процесса при помощи метода *EMD*: а) сравнение результатов выделения медленной составляющей деформационного процесса методом Эмпирической Модовой Декомпозиции и цифровой фильтрацией; б) монотонный дрейф и низкочастотные моды выделенные в деформационном сигнале с помощью методики *EMD*

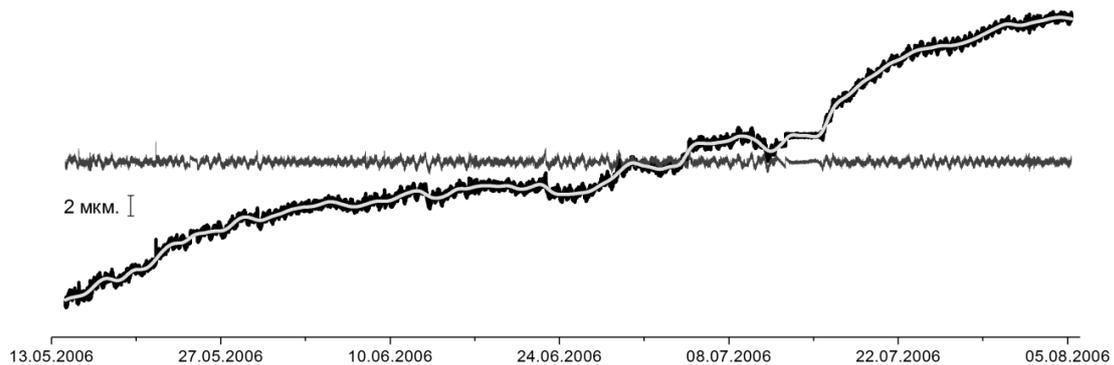


Рис. 2. Результат снятия дрейфа и медленной составляющей деформационного процесса посредством метода Эмпирической Модовой Декомпозиции

Результат очистки исходного сигнала от монотонной части деформации представлен на Рис. 2. Помимо «выпрямленного» результирующего графика, на котором отчетливо проявились приливные колебания, на рисунке представлен исходный сигнал с наложенным на него монотонной частью. Рис. 2 демонстрирует отсутствия «краевого» эффекта при выделении монотонной части сигнала методом *EMD*.

Для большей убедительности в эффективности метода *EMD* и отсутствии у него «краевых» особенностей, приведен Рис. 3, на котором представлен деформационный сигнал и выделенная медленноменяющаяся часть, а также схожим образом посчитанная медленноменяющаяся часть сигнала от расширенных данных на 7 дней в каждую

сторону. На Рис. 3 можно наблюдать полное совпадение выделяемых сигналов.

Основной потенциал *EMD* при работе с деформографическими данными, заключается в возможностях применения этого метода для изучения нестационарных процессов в диапазоне сверхдлиннопериодных колебаний земли. Внутри этого диапазона в ходе непрерывной регистрации деформационных процессов в земной коре с целью поисков предвестников землетрясений ранее было обращено внимание на закономерно повторяющийся эффект. Суть эффекта состоит в том, что на графиках деформаций, соответствующих каждому из регистрирующих интерферометрических плеч, в отдельности, отчетливо проявлялось необычное возмущение на фоне приливных колебаний за 1.5 – 2 суток перед землетрясениями. Более подробно эффект

описан в [4-6]. Литосферные возмущения отчетливо регистрировались в виде цугов деформационного шума в полосе периодов колебаний 0.5 – 2 часа, однако в связи с

непродолжительностью возмущений, детально изучать их структуру классическими методами анализа весьма затруднительно.



Рис. 3. Отсутствие краевых эффектов в методе EMD

Пример применения метода EMD к участку деформограммы длиной 5 суток содержащему описанный эффект представлен на Рис. 4. На верхней части Рис. 4 показана нефильтрованная деформограмма, на которой на фоне полусуточного прилива отчетливо выделяются деформационные возмущения, сопоставимые по

амплитуде с самими приливами. Вторая кривая на верхней части Рис. 4 является суперпозицией четырех мод, в которых в процессе декомпозиции наиболее явно выделялись соответствующие возмущения, эти моды по отдельности представлены на нижнем графике.

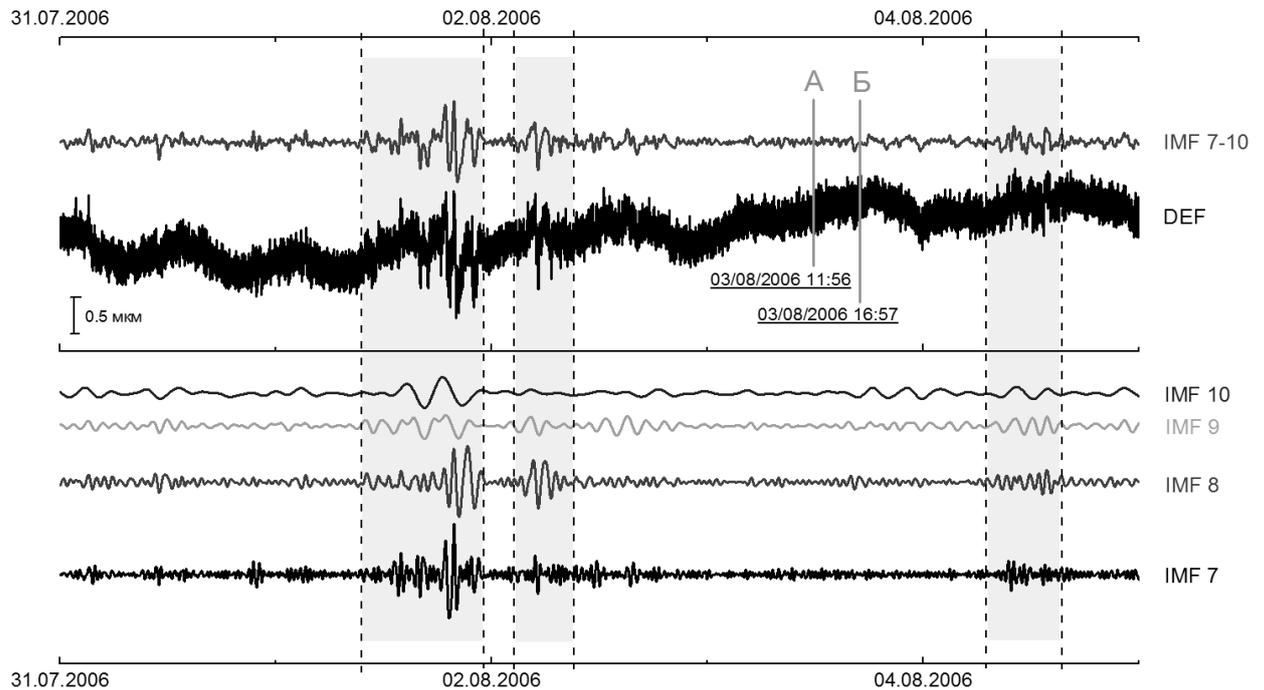


Рис. 4. Возбуждение СДПК накануне региональных землетрясений:

А – Землетрясение 03/08/2006  $\varphi = 55.40$   $\lambda = 110.41$   $K = 12.0$   
 Б – Землетрясение 03/08/2006  $\varphi = 55.41$   $\lambda = 110.40$   $K = 12.2$

По представленным кривым можно судить о времени вступления раскочки и её продолжительности (участки, отмеченные серыми прямоугольниками). Так же можно судить о амплитудно-частотной динамике явления и выделить наиболее представительный

диапазон. На представленном примере видно несинхронное проявление эффекта в различных модах, однако наибольшую амплитуду сигнал имеет в моде 8, что соответствует для этой декомпозиции диапазону периодов 1-2 час. Внутри этой моды можно выделить отдельные

гармониками с периодами порядка 62, 73 и 85 минут, которые наиболее ярко выделяются в период описываемого возбуждения. Присутствие эффекта обнаруживается и в более высокочастотных модах (например, 5 и 6), но там оно менее выражено и значительно уступает по амплитуде сигнала. Применение метода *EMD* к исследуемому участку позволяет не только выделить исследуемый сигнал для дальнейшей обработки, но и детально проанализировать его поведение в отдельных частотных диапазонах (модах), что в дальнейшем может дать дополнительную информацию, необходимую для интерпретации явления и определения его прогностического потенциала.

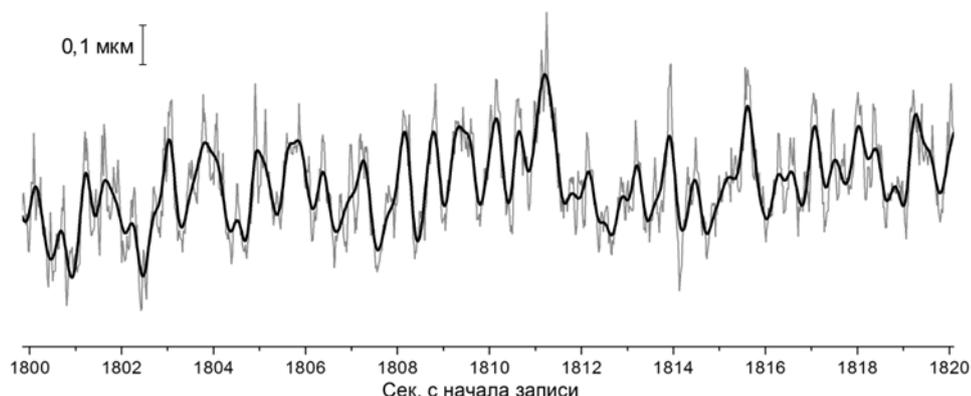


Рис. 5. Применение EMD для фильтрации шумовой составляющей сигнала

Благодаря применению метода *EMD* в частности удалось еще раз убедиться в предположении высказанном в [7] о не шумовой природе суточной вариации амплитуды высокочастотной компоненты в деформационном сигнале, поскольку эффект полностью отсутствует в первой выделяемой моде.

## 8. УСОВЕРШЕНСТВОВАННАЯ ПРОГРАММА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЕФОРМОГРАФИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Программа «Processing-def» предназначена для просмотра, конвертации и обработки данных лазерного деформографа. Для этого в программе реализованы следующие функции.

### 8.1 Открытие файлов данных

Для того, чтобы открыть один или несколько файлов, необходимо выбрать пункт меню «Open» в меню «File». В появившемся диалоговом окне необходимо выбрать требуемые файлы и нажать "Открыть". При выборе нескольких файлов программа откроет их в одной вкладке.

### 8.2. Сохранение обработанных данных

Программа «Processing-def» позволяет сохранять файлы в форматах: miniseed, baikal и ascii. Для этого следует в меню «File» выбрать

В заключение стоит обратиться к примеру применения *EMD* для очистки сигнала от высокочастотной компоненты включая шумы различной природы. На Рис. 5 представлен результат такой работы. Для этого из исходного сигнала были вычтены первые три моды (*IMF<sub>1</sub>–IMF<sub>3</sub>*). Метод хорошо справляется с поставленной задачей и не уступает в производительности своим более распространенным конкурентам, при этом у него отсутствуют особенности на краях и он более эффективно справляется с единичными выбросами.

пункт «Save». В появившемся диалоговом окне необходимо выбрать директорию, имя и формат сохраняемого файла. Следует отметить тот факт, что данные будут сохранены в один файл, даже если было открыто несколько файлов. Таким образом можно объединить несколько файлов в один.

### 8.3. Просмотр файла данных

В случае, если в обрабатываемом файле содержатся данные нескольких измерительных каналов, то они отображаются друг над другом. Каждый канал можно выбрать, кликнув на нём правой кнопкой мыши. Для выбранного канала можно изменить масштаб с помощью кнопок «+»/«-» на клавиатуре. Также, можно выделить требуемый участок, зажав правую кнопку мыши, и нажать «Пробел». В этом случае масштаб будет выбран такой, чтобы выделенная область целиком заняла пространство по горизонтали.

По умолчанию (при открытии файла), масштаб выбирается таким образом, чтобы отобразить все данные канала. В случае, если масштаб увеличен, по каналу можно перемещаться с помощью стрелок вправо и влево.

Вернуться к оригинальному масштабу можно нажав клавишу «\*».

Также, выбранный канал можно отобразить на весь экран, скрыв остальные каналы, нажав «Ctrl-M» или выбрав пункт меню «Maximize»

trase» в меню «View». Вернуться к нормальному отображению можно повторно нажав «Ctrl-M».

Для того, чтобы скрыть некоторые каналы, необходимо вызвать «Trace Filter» из меню «View». В открывшемся диалоговом окне следует убрать галочки с названий тех каналов, отображение которых не требуется. При этом они останутся в памяти. Чтобы выгрузить их из памяти, необходимо отметить опцию «Unload unused traces».

#### 8.4. Редактирование файла данных

Выбранный фрагмент канала можно скопировать в буфер обмена. Для этого необходимо нажать «Ctrl-C» или выбрать пункт «Сору» из меню «Edit». Из скопированного фрагмента можно создать новый файл, выбрав пункт «Paste as new file» из меню «Edit».

Полностью канал из файла можно удалить, выбрав канал и нажав «Delete trace» в меню «Edit».

Кроме этого, существует возможность прямого редактирования сигнала. Для этого необходимо, удерживая клавишу «Ctrl» правой кнопкой мыши переместить указанную точку выше или ниже на требуемый уровень.

В программе реализовано несколько модулей, позволяющих осуществлять различную обработку данных.

#### 8.5. Вычитание среднего значения

Для вычитания среднего значения необходимо выбрать пункт меню «Process → General → Remove mean». Эта функция считает среднее значение в выбранном канале и вычитает его из всех точек канала. Если не выбран ни один канал, работа производится над всеми каналами.

#### 8.6. Просмотр спектра

Для просмотра спектра выбранного канала следует выбрать пункт «Process → Analysis → Spectrum».

#### 8.7. Вычитание значений компенсационного плеча

Для вычитания сигнала компенсационного плеча из измерительных плеч, необходимо выбрать «Process → Deformograph → Apply comp. Channel». В появившемся диалоговом окне необходимо выбрать измерительные каналы (пункты «Channel 1» и «Channel 2»), компенсационный канал («Compensation channel»), коэффициент для компенсационного канала и ввести имена обработанных каналов. После нажатия кнопки «ОК», будут созданы два новых канала с заданными именами, содержащие обработанные данные.

На Рис. 6–8 приведены меню интерфейса пользователя.

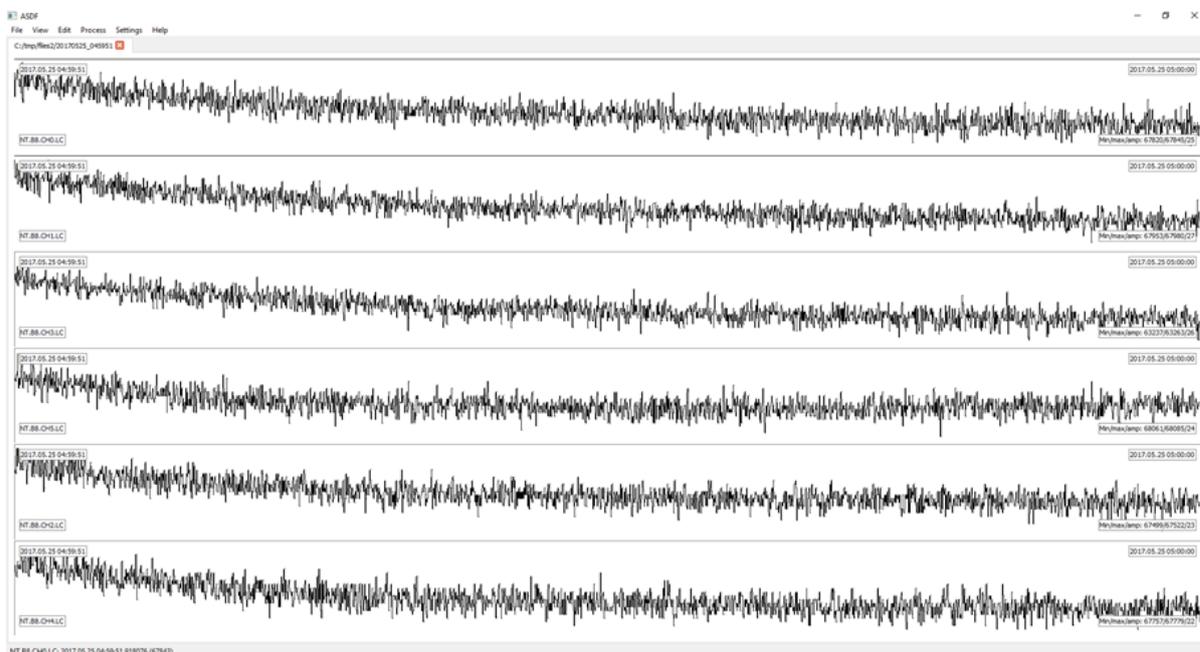


Рис. 6. Главное окно программы

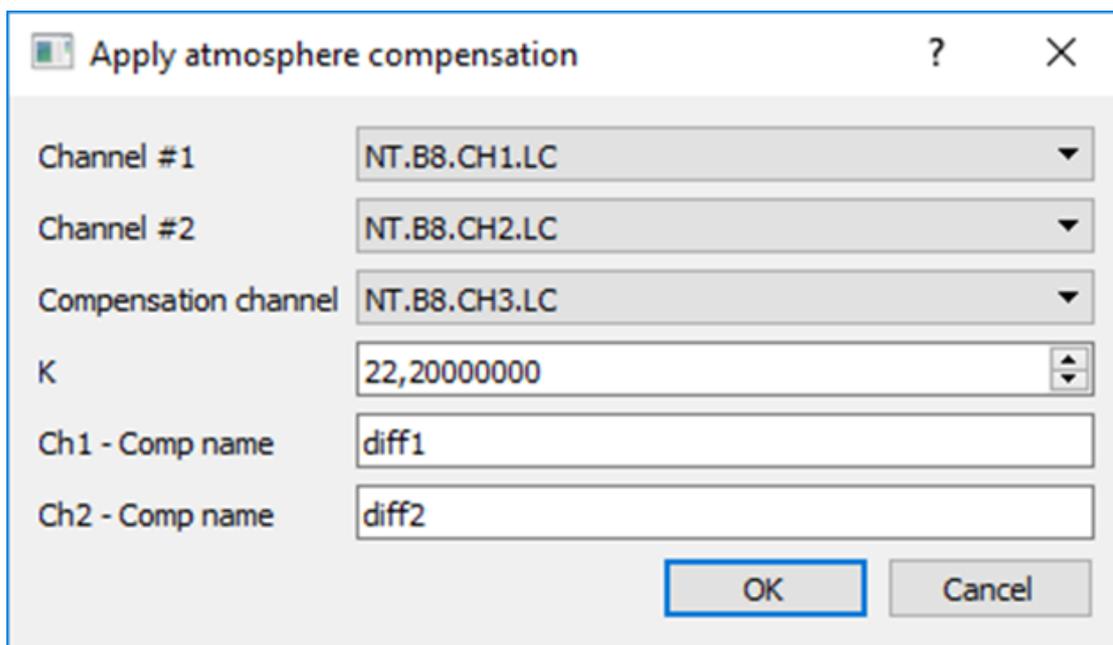


Рис. 7. Окно диалога компенсации

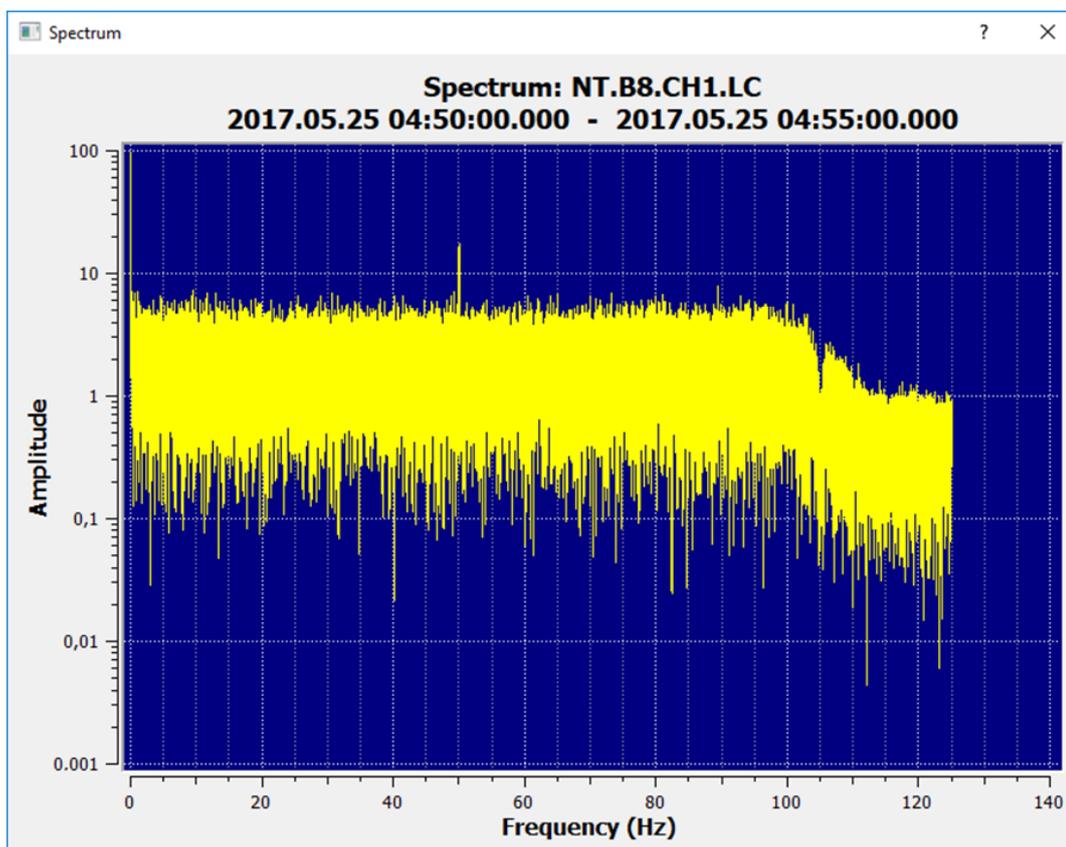


Рис. 8. Окно спектральной обработки

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Важнейшие результаты, полученные в ходе выполнения проекта.

В ходе работ по теме НИР все ожидаемые результаты, отраженные в плане НИР СИФ ФИЦ ЕГС РАН, получены

1. Исследована возможность использования метода эмпирической модовой декомпозиции

для обработки данных деформографических измерений. Показано, что описанный метод хорошо подходит для изучения эффекта возбуждения сверхдлиннопериодных колебаний (СДПК) накануне землетрясений.

Адаптация метода эмпирической модовой декомпозиции к реальным деформографическим данным позволяет раскрыть его высокий потенциал для работы с геофизическими

данными и деформограммами, позволяет эффективно выявлять локальные особенности сигналов, их внутреннюю структуру, очищать их от шумов, проводить регуляризацию и выделять медленную часть сигнала, включая монотонный тренд.

Описанный метод как нельзя лучше подходит для изучения эффекта возбуждения сверхдлиннопериодных колебаний (СДПК) накануне землетрясений, поскольку эффект носит кратковременный характер и не линейен как по амплитуде, так и по частоте.

Применение EMD для изучения СДПК в дальнейшем может дать дополнительную информацию необходимую как для интерпретации явления, так и определения его прогностического потенциала.

2. Разработана усовершенствованная программа для просмотра и предварительной обработки данных лазерных деформографических измерений «Processing-def». Программа позволяет считывать данные в разных форматах, просматривать данные и выполнять их обработку. Обработанные данные могут быть сохранены как в оригинальном формате, так и в текстовом (ASCII).

Программа внедрена в секторе ЛГН СИФ ФИЦ ЕГС РАН и апробирована на примере экспериментальных данных деформографических измерений полученных в процессе отладки макета усовершенствованной системы регистрации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen, The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224
- [2] Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 454, 903-995, 1998.
- [3] Z. Wu and N. E. Huang, "Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method," Advances in Adaptive Data Analysis, vol. 1, no. 1, pp. 1-41, 2009.
- [4] Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н., «О связи сейсмичности земли с солнечной активностью по результатам прецизионных деформографических наблюдений», Геодинамика и напряженное состояние недр Земли 2008. С. 31-40.
- [5] Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н., «Солнечная активность, колебания внутреннего ядра земли, общепланетарная сейсмичность», Геодинамика внутриконтинентальных орогенов и геоэкологические проблемы сборник материалов четвертого международного симпозиума, 15-20 июня 2008 года. Москва, 2009. С. 321-326.
- [6] Орлов В.А., Панов С.В., Парушкин М.Д., Фомин Ю.Н., Токмолдин С.Ж., Невмержитский И.С., Узбеков Н.Б., Терешкин Д.О., «Пространственно разнесенные высокочувствительные лазерные деформографические наблюдения в изучении сверхдлиннопериодных колебаний земли», Геодинамика и напряженное состояние недр Земли Труды Всероссийской конференции, посвященной 80-летию академика М.В. Курлени (с участием иностранных ученых): в 2 томах; Институт горного дела СО РАН. 2011. С. 145-150.
- [7] Орлов В.А., Парушкин М.Д., «Явление суточной повторяемости возбуждения шума в сигналах лазерного деформографа», Интерэкспо Гео-Сибирь. 2012. Т. 2. № 3. С. 124-130.
- [8] Thomas Jahr, Corinna Kroner, Andrea Lippmann, Strainmeters at Moxa observatory, Germany // Journal of Geodynamics 41 (2006) 205-212.
- [9] Melchior P., 1983. The tides of the planet Earth, 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, 641 pp.
- [10] Dehant V, Defraigne P, Wahr J., 1999, Tides for a convective Earth. // J. Geoph. Res., 104, B1, P. 1035-1058.
- [11] Ducarme B., Venedikov A. P., Arnoso J., Vieira R., 2004, Determination of the long period tidal waves in the GGP superconducting gravity data. // J. of Geodynamics, 38, P. 307-324.
- [12] Ducarme B., Vandercoilden L., Venedikov A.P., 2006. The analysis of LP waves and polar motion effects by ETERNA and VAV methods. // Bulletin Inf. Marées Terrestres, 141, P. 11201-11210.
- [13] B. Ducarme, V.Yu. Timofeev, M. Everaerts, P.Y. Gornov, V.A. Parovishnii, M. van Ruymbeke. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. // Journal of Geodynamics, v. 45, N.2-3, 2008, P.73-82.
- [14] Wenzel H.G., 1996, The nanogal software: earth tide data processing package ETERNA 3.30. // Bull. Inf. Marées Terrestres, 124, P. 9425-9439.
- [15] Timofeev V. Y., Ardyukov D. G., Gribova E. I., van Ruymbeke M., Ducarme B., 2009, Tidal and long-period variations observed with tiltmeters, extensometers and well-sensor (Baikal rift, Talaya station). Bull. Inf. Marées Terrestres, 135 p.
- [16] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227-234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [17] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491-498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [18] V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations // Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC - 2012), P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.
- [19] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers.

- Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometria). 2003. 39(2), P. 43-47.
- [20] V. A. Zhmud, A. M. Goncharenko. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. Proc. of Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering" (APEIE-2016): Novosibirsk, Oct., 3-6, 2016: in 12 V. – V. 1, part 1. – P. 314-318. - ISBN 978-5-7782-2991-4.
- [21] 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. 45(4), P. 97-100.
- [22] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.
- [23] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [24] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [25] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P.567-574.
- [26] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. Proc. of: 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P. 615-622.

**Юрий Николаевич Фомин**

Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СИФ ФИЦ ЕГС РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, начальник сектора, (383) 333 38 41, E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**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



**Владим Михайлович Семибаламут** – к.ф.-м.н., директор Сибирского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия.

E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)



**Терешкин Денис Олегович** Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СИФ ФИЦ ЕГС РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, ведущий электроник, (383) 333 38 41, E-mail: [denis@kasan.ws](mailto:denis@kasan.ws)

**Сергей Владимирович Панов**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, старший научный сотрудник, (383) 333 30 72, E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)



Д.т.н. **Любомир Димитров** – Профессор, Технический университет Софии, машиностроительный факультет, Болгария. Области интереса: мехатроника, адаптивное и оптимальное управление, интеллектуальные системы диагностики и управления, MEMS.

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

Статья поступила 16.01.2019.

**Application of the Empirical Mode Decomposition Method for Processing the Results of Deformographic Measurements**

Yu.N. Fomin<sup>1</sup>, V.A. Zhmud<sup>2,3</sup>, V.M. Semibalamut<sup>1</sup>, D.O. Tereshkin<sup>1</sup>, S.V. Panov<sup>3</sup>, L.V. Dimitrov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

*Abstract:* Deformographic studies are due to the need to fill in the lack of information about earthquake precursors and, as a result, the lack of reliable methods for their prediction. This deficiency is especially acute in the Baikal region, where the insufficient technical equipment of the existing geodynamic polygons does not allow one to achieve sufficiently reliable results in identifying the precursors of earthquakes. Creating an automated, highly reliable laser measuring equipment is paramount in organizing a network of points of laser deformographic observation points to identify early physical earthquake precursors and to solve applied problems of engineering seismology. The article considers the possibility of using the empirical mode decomposition method for processing data obtained as a result of using a laser rock strain gauge developed by the Institute of Laser Physics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences and used at the Talaya Observatory in the Baikal Rift Zone. The results of applying this method to real data are given.

*Key words:* information processing, laser physics, earthquake precursors, accuracy, filtration

## REFERENCES

- [1] Norden E. Huang, Samuel S.P. Shen, The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224
- [2] Huang, N. E., Z. Shen, S. R. Long, M. C. Wu, H. H. Shih, Q. Zheng, N.-C. Yen, C. C. Tung, and H. H. Liu: The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proc. R. Soc. London, Ser. A, 454, 903-995, 1998.
- [3] Z. Wu and N. E. Huang, "Ensemble empirical mode decomposition: A noise-assisted data analysis method," Advances in Adaptive Data Analysis, vol. 1, no. 1, pp. 1-41, 2009.
- [4] Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin YU.N., «O svyazi seysmichnosti zemli s solnechnoy aktivnost'yu po rezul'tatam pretsizionnykh deformograficheskikh nablyudeniy», Geodinamika i napryazhennoye sostoyaniye nedr Zemli 2008. S. 31-40.
- [5] Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin YU.N., «Solnechnaya aktivnost', kolebaniya vnutrennego yadra zemli, obshcheplanetarnaya seysmichnost'», Geodinamika vnutrikontinental'nykh orogenov i geookologicheskiye problemy sbornik materialov chetvertogo mezhdunarodnogo simpoziuma, 15-20 iyunya 2008 goda. Moskva, 2009. S. 321-326.
- [6] Orlov V.A., Panov S.V., Parushkin M.D., Fomin YU.N., Tokmoldin S.ZH., Nevmerzhiyskiy I.S., Uzbekov N.B., Tereshkin D.O., «Prostranstvenno raznesennyye vysokochuvstvitel'nyye lazernyye deformograficheskiye nablyudeniya v izuchenii sverkhdlinnoy periodnykh kolebaniy zemli», Geodinamika i napryazhennoye sostoyaniye nedr Zemli Trudy Vserossiyskoy konferentsii, posvyashchennoy 80-letiyu akademika M.V. Kurleni (s uchastiyem inostrannykh uchenykh): v 2 tomakh; Institut gornogo dela SO RAN. 2011. S. 145-150.
- [7] Orlov V.A., Parushkin M.D., «Yavleniye sutochnoy povtoryayemosti vzbuzhdeniya shuma v signalakh lazernogo deformografa», Interekspo Geo-Sibir. 2012. T. 2. № 3. S. 124-130.
- [8] Thomas Jahr, Corinna Kroner, Andrea Lippmann, Strainmeters at Moxa observatory, Germany // Journal of Geodynamics 41 (2006) 205-212.
- [9] Melchior P., 1983. The tides of the planet Earth, 2nd ed. Pergamon Press, Oxford, 641 pp.
- [10] Dehant V, Defraigne P, Wahr J., 1999, Tides for a convective Earth. // J. Geoph. Res., 104, B1, P. 1035-1058.
- [11] Ducarme B., Venedikov A. P., Arnos J., Vieira R., 2004, Determination of the long period tidal waves in the GGP superconducting gravity data. // J. of Geodynamics, 38, P. 307-324.
- [12] Ducarme B., Vandercoilden L., Venedikov A.P., 2006. The analysis of LP waves and polar motion effects by ETERNA and VAV methods. // Bulletin Inf. Marées Terrestres, 141, P. 11201-11210.
- [13] B. Ducarme, V.Yu. Timofeev, M. Everaerts, P.Y. Gornov, V.A. Parovishnii, M. van Ruymbeke. A Trans-Siberian Tidal Gravity Profile (TSP) for the validation of the ocean tides loading corrections. // Journal of Geodynamics, v. 45, N.2-3, 2008, P.73-82.
- [14] Wenzel H.G., 1996, The nanogal software: earth tide data processing package ETERNA 3.30. // Bull. Inf. Marées Terrestres, 124, P. 9425-9439.
- [15] Timofeev V. Y., Ardyukov D. G., Gribanova E. I., van Ruymbeke M., Ducarme B., 2009, Tidal and long-period variations observed with tiltmeters, extensometers and well-sensor (Baikal rift, Talaya station). Bull. Inf. Marées Terrestres, 135 p.
- [16] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227-234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [17] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491-498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [18] V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations // Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC - 2012), P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.
- [19] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). 2003. 39(2), P. 43-47.
- [20] V. A. Zhmud, A. M. Goncharenko. Modern problems of high-precision measurements of the phase differences. Proc. of Intern. Conf. "Actual problems of electronic instrument engineering" (APEIE-2016): Novosibirsk, Oct., 3-6, 2016: in 12

V. – V. 1, part 1. – P. 314-318. - ISBN 978-5-7782-2991-4.

- [21] 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. 45(4), P. 97-100.
- [22] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.
- [23] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [24] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM*. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [25] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. *Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P.567-574.*
- [26] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. *Proc. of: 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P. 615-622.*

**Yury N. Fomin**

Siberian Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences" (SIBGSRAS), Chief of Laser sector, 630090, Novosibirsk, pr. Ak. Lavrentieva 13/3, D. Sc., phone (383)333-38-41  
E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**Vadim 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



**Vladimir Semivalamut** – PhD, Director of Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)



**Denis O. Tereshkin**

Siberian Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences (SIBGSRAS), prosp. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, engineer, phone (383)330-38-41.

E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)

**Sergei V. Panov**

Institute of Laser Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences RAS, pr. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, Senior Scientific worker, phone (383)333-30-72

E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)



Dr. of Techn. Sci. **Lubomir Dimitrov.**

Full Professor.

Technical University of Sofia, Faculty of Mechanical Engineering, Bulgaria

Mechatronics, Adaptive and optimal control, Intelligent diagnostic and control systems, MEMS.

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

The paper was received on 16.01.2019.

# Анализ сигнала измерителя деформаций земной коры в Байкальской рифтовой зоне

Ю.Н. Фомин<sup>1</sup>, В.А. Жмудь<sup>2,3</sup>, В.М. Семибаламут<sup>1</sup>, Д.О. Терешкин<sup>1</sup>, С.В. Панов<sup>3</sup>, Л.В. Димитров<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Сибирский филиал Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>4</sup> Технический университет Софии, София, Болгария

*Аннотация:* С 1994 года по настоящее время регулярно ведутся записи деформаций Земной коры, которые измеряются лазерным измерителем перемещений, называемым деформографом. Этот измеритель регистрирует изменения расстояний между зеркалами, укрепленными на скальной породе внутри штольни в двух направлениях: Север-Юг и Запад-Восток. Такие наблюдения осуществляются в районе Горного Алтая, в Казахстане и вблизи озера Байкал. Один из длительно действующих деформографов установлен в штольне сейсмостанции «Талая» в Байкальской рифтовой зоне (БРЗ). Записи деформаций (деформограммы) анализируются с целью исследования процессов в Земной коре и для выявления предвестников землетрясений. В 2016 году была проведена работа по систематизации цифровых записей деформационного процесса за период с 1994 по 2016 годы. Составлен цифровой каталог дающий общее представление об имеющемся в распоряжении материале для обработки. Записи за 2016 год проанализированы особенно детально. Данная статья сообщает наиболее интересные результаты этого анализа.

*Ключевые слова:* обработка информации, лазерная физика, предвестники землетрясений, точность, фильтрация

## ВВЕДЕНИЕ

Лазерный измеритель деформаций скальных пород, называемый деформографом, используется для регистрации деформаций Земной коры в двух ортогональных направлениях для изучения процессов в коре и для обнаружения предвестников землетрясений. Оптическая схема прибора и его электронная и программно-аппаратная части описаны в публикациях [1–10]. Прибор измеряет приращение длины в скальной породе на измерительных плечах длиной 25 м в направлениях Север-Юг и Запад-Восток. Для устранения влияния атмосферы также в приборе имеется компенсационное плечо с эталоном длины. Регистрируются приращения длины по каждому плечу в отдельности, а также разность приращений в двух плечах. Настоящая статья сообщает о результатах обработки данных, полученных, начиная с 1994 года по настоящее время, в штольне обсерватории «Талая», которая расположена в Байкальской рифтовой зоне. В 2016 году была проведена работа по систематизации цифровых записей деформационного процесса за период с 1994 по 2016 годы. Составлен цифровой каталог дающий общее представление об имеющемся в распоряжении материале для обработки. Записи за 2016 год проанализированы особенно детально. Результаты этой обработки представлены в настоящей статье.

## 1. РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ НАКОПЛЕННЫХ ДАННЫХ

Зафиксировано регулярное изменение амплитуды сигнала и шума. Показано относительно регулярное повторение

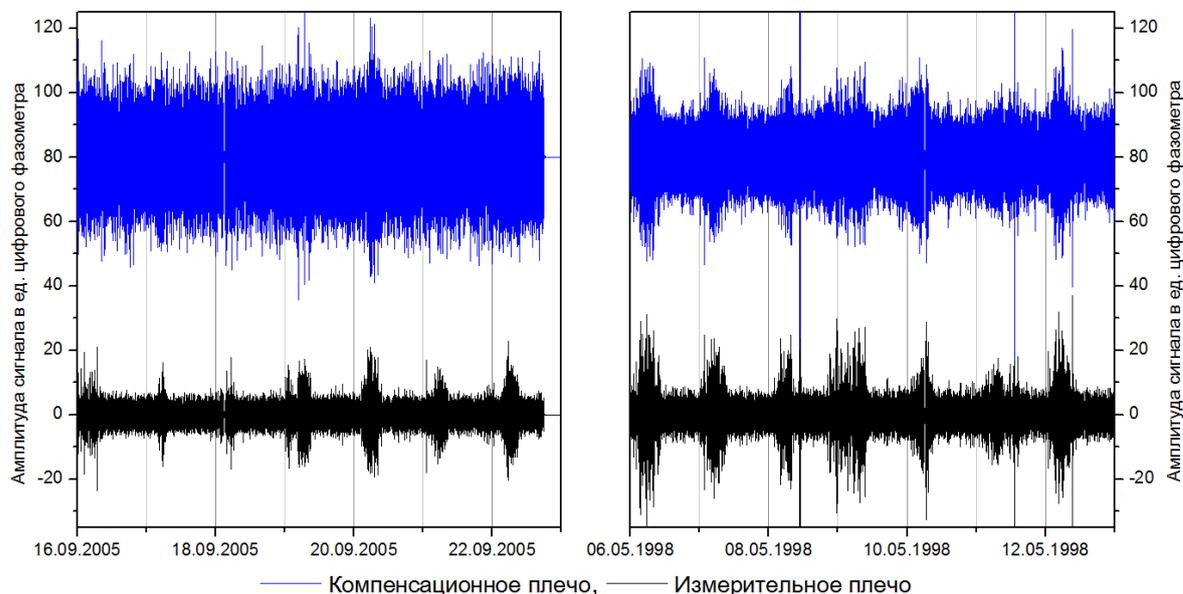
максимумов огибающей амплитуды шума каждые 24 часа с наивысшим ее значением, в период нахождения Солнца в зенитном положении. Доказано, что этот эффект не связан с вариациями метеорологических параметров (давление, температура, облачность, осадки). Показано наличие годовой вариации, как амплитуды, так и положения максимума регистрируемого эффекта.

Выделены участки деформограмм, на которых наблюдается суточная периодичность в сигнале компенсационного плеча, чего это не выявлялось без использования корреляционных подходов. Это можно наблюдать на *Рис. 1*, где представлены две семидневные деформограммы отфильтрованные в диапазоне 20–40 с. Верхние графики относятся к фильтрованному сигналу компенсационного канала, а нижние к сигналу измерительного плеча. В левой части показан характерный пример записи, где в компенсационном плече из-за высокого уровня шума сложно зафиксировать наличие суточной вариации амплитуды сигнала, в правой части показан редкий случай, где этот эффект виден в компенсационном плече без дополнительной обработки.

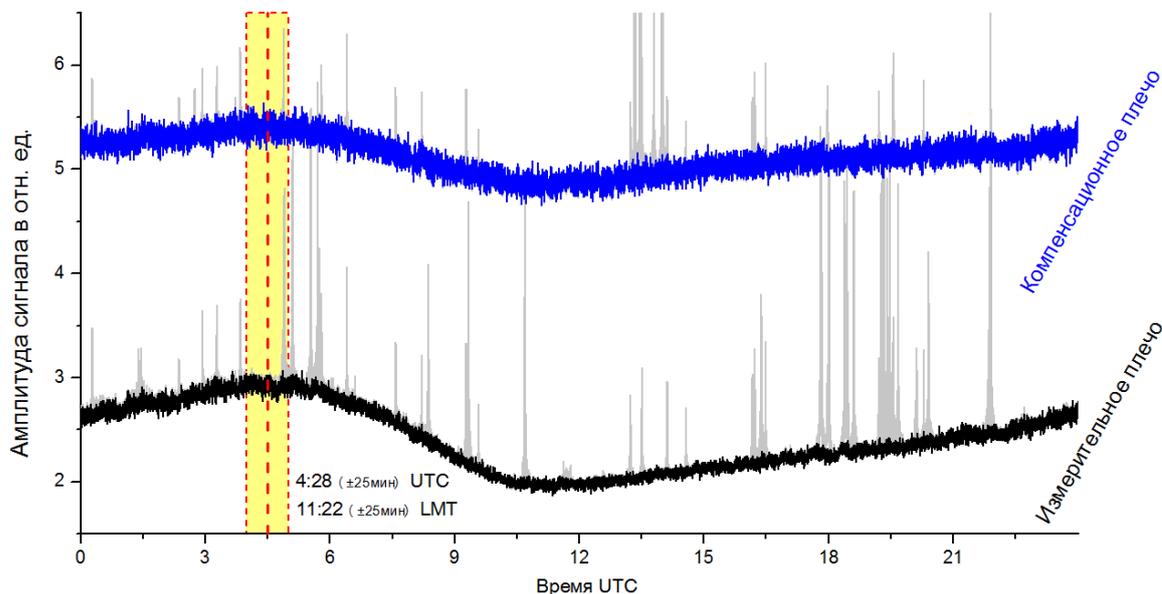
Здесь и в дальнейшем из двух измерительных каналов представляется только один в связи с практически полной идентичности эффекта в обоих каналах. При этом сигнал в компенсационном и измерительных плечах похожи, но не пропорциональны. Уровень сигнала в компенсационном плече соответствует вариациям давления в диапазоне 5–15 мбар. С целью уточнения положения суточного максимума в вариациях амплитуды сигнала проведено усреднение по ансамблю

среди дней, в которых отсутствовали разрывы в записях суммарно превышающие 3 часа. Также исключены из обработки дни, в записях которых присутствовали землетрясения или другие возмущения, амплитуда которых на порядок превышала ожидаемую величину. Поэтому в усреднении использовано 4857 суточных отрезка. Результат усреднения представлен на *Рис. 2*, серым цветом

представлен результат усреднения без отсева отдельных дней, в котором приняло участие 4963 суток. Уточненный максимум приходится на  $4:28 \pm 25 \text{ мин UTC}$  или  $11:22 \pm 25 \text{ мин LMT}$  (*Local Mean Time* – среднее солнечное время). Из *Рис. 2* явно следует наличие суточной вариации амплитуды сигнала в компенсационном плече. На рисунке представлены усреднения без дополнительных сглаживаний.



*Рис. 1.* Характерные записи сигналов фильтрованных деформограмм



*Рис. 2.* Усредненная вариация амплитуда сигнала в течение суток

Отсутствие техногенного источника рассматриваемого эффекта следует из усреднения амплитудных вариаций среди суточных отрезков деформограмм сгруппированных по дням недели. Как видно на

*Рис. 3*, в течение недели эффект не видоизменяется. В квадратных скобках под названием дня недели стоит число дней использованных для получения конкретного участка графика.

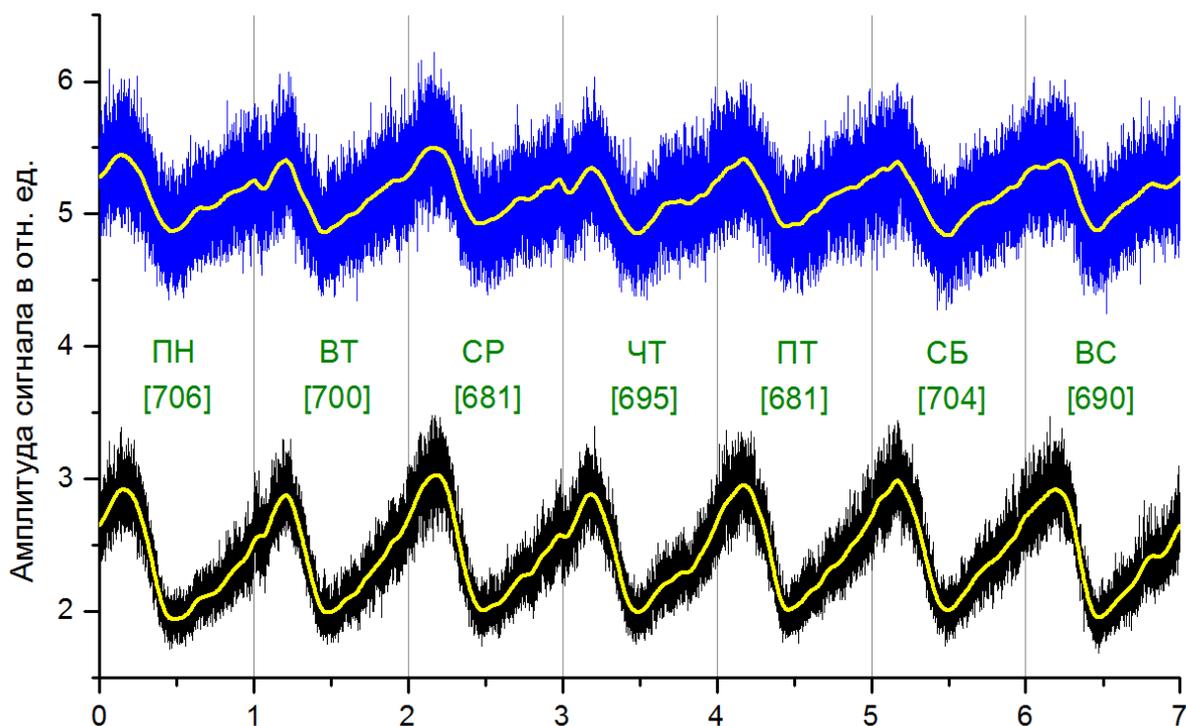


Рис. 3. Усредненная суточная вариация амплитуды по дням недели

Ранее показано что эффект не стационарен и видоизменяется в течение года. Для анализа изменения амплитуды на протяжении года взяты усредненные по ансамблю наборы суточных вариаций амплитуды сгруппированные по месяцам. Обобщенный результат представлен на Рис. 4, серым цветом

представлены усредненные сигналы, а более темной линией – результат их сглаживания с треугольным окном шириной около 2 часа. Практически во всех месяцах выделяется не один, а два максимума, при этом меняется как их амплитуда, так и положение.

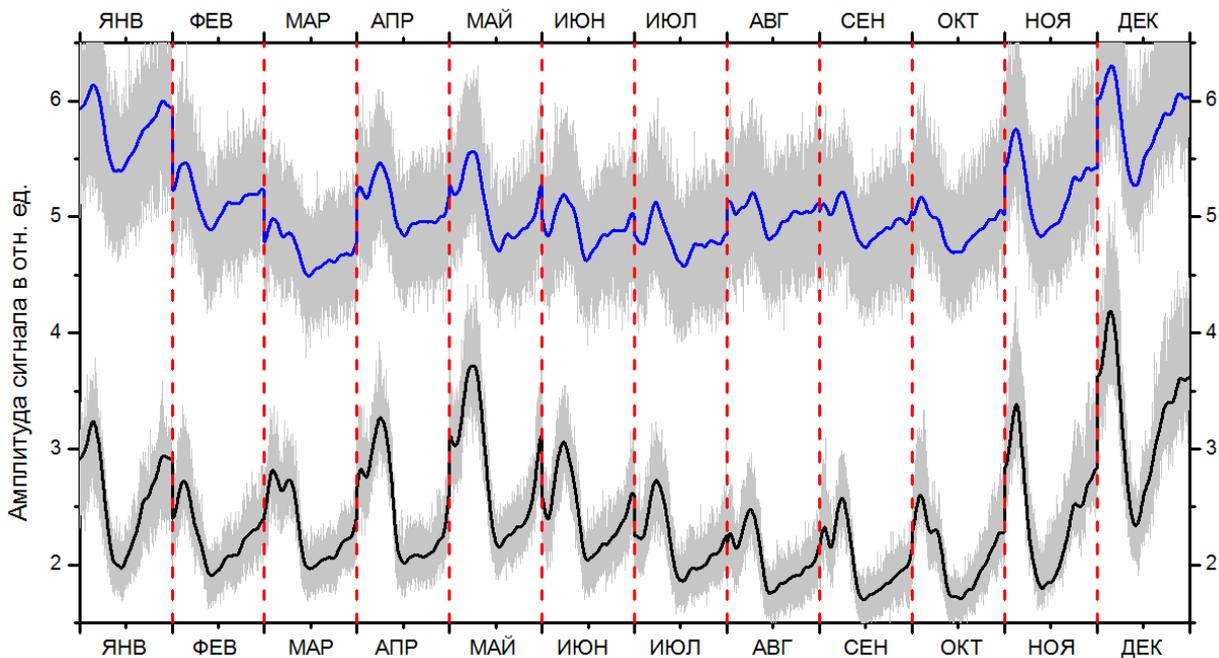


Рис. 4. Усредненная суточная вариация амплитуды по месяцам

Для более детального рассмотрения динамики изменения амплитуд и положений максимумов год был разбит на пятидневные отрезки и посчитаны усредненные суточные

вариации амплитуды сигнала отдельно для каждого набора. Так же для удобства восприятия вместо шкалы всемирного времени использовано среднее солнечное время

поскольку, как уже было показано ранее, усредненный за год максимум лежит вблизи времени зенитного положения Солнца. При этом мы отказались от использования местного солнечного времени, поскольку при использовании «уравнения времени» временная шкала сдвигается в течение года на величину около 18 мин, что значительно меньше длительности возмущений и сопоставимо с точностью локализации их максимумов. Объединив результаты усреднения, получаем двумерные гистограммы, как на Рис. 5, где по осям абсцисс и ординат отложены соответственно месяц и время от начала дня, а цветом указан уровень амплитуды сигнала от темного к светлому, по мере возрастания интенсивности. Перед визуализацией гистограмма была сглажена по временной шкале с применением треугольного окна шириной 2 часа, а по оси абсцисс – треугольным окном шириной 5 точек. Красной горизонтальной линией отмечено время, соответствующее полуночи по мировому времени. Набор желтых точек отмечает положение явно выделяемых максимумов в распределениях. Выявлено существование двух максимумов. Один из них наблюдается с мая по октябрь и локализуется приблизительно в одно и то же время при этом с марта по май его амплитуда растет, а с мая по октябрь падает.

Другой максимум наблюдается на протяжении всего года, при этом меняется как его амплитуда, так и его положение во времени. Этот максимум сдвигается за первую половину года на 4 часа в сторону начала дня, а во время второй половины – возвращается обратно в сторону полудня. Вариация его амплитуды содержит два максимума: декабрь и май.

Другой способ наглядно продемонстрировать эволюцию суточного распределения амплитуды сигнала это представить распределения в едином масштабе на одном графике. Однако в связи с большим числом кривых, для более удобного восприятия кривые разбиты на шесть групп (по два месяца или 12 кривых) и показаны в едином масштабе отдельными графиками (см. Рис. 6). Также на каждом из графиков пунктирной линией нарисована кривая соответствующая усредненной вариации амплитуды сигнала в течение суток за все время наблюдения. Стрелочками показано направление изменения со временем максимумов, а рядом со стрелочками представлены время локализации максимумов в начале и в конце представленного периода с точностью около 5 мин. Кроме описанных двух максимумов, существует ещё и третий, который выделяется только в зимние месяцы и локализован в ночное время около 4:40 LMT (21:46 UTC).

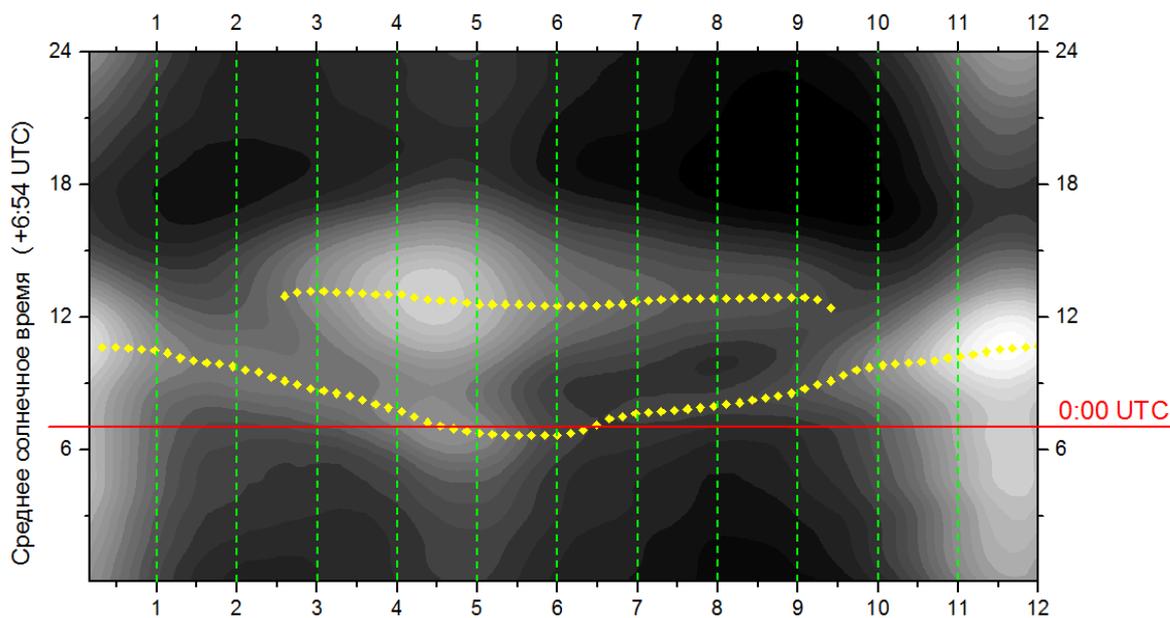


Рис. 5. Распределение амплитуды сигнала деформографа в измерительном плече в диапазоне 20-40 с

Рис. 7 показывает годовую вариацию среднего уровня сигнала измерительного и компенсационного плеч в течение суток. Видно

увеличение уровня в декабре и мае и периоды затишья в феврале-марте и июле-октябре.

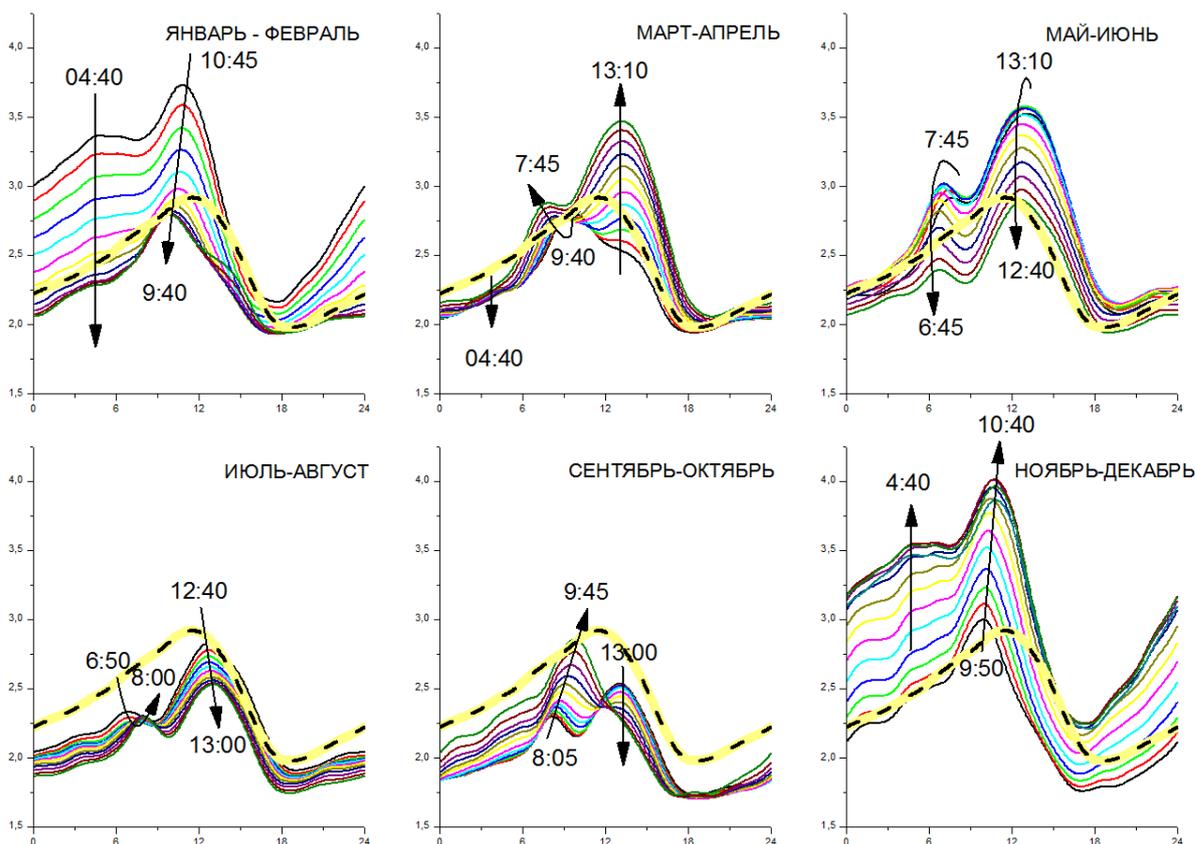


Рис. 6. Эволюция в течение года суточного распределения амплитуды сигнала отфильтрованного в диапазоне 20-40 с

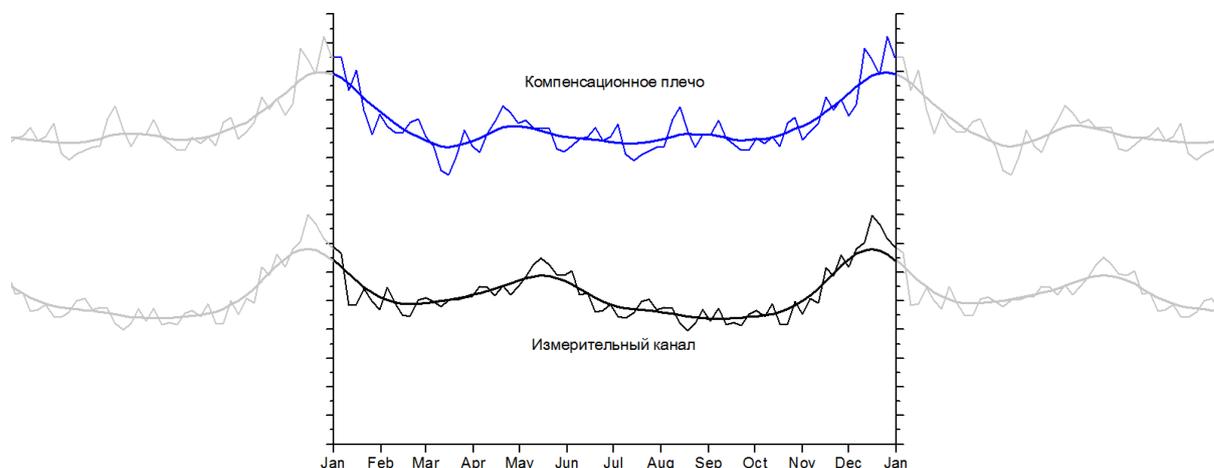


Рис. 7. Годовые вариации среднесуточной амплитуды сигнала в диапазоне 20-40 с в измерительном и компенсационном плече

Также отметим ряд различий в поведении максимумов в измерительном и компенсационном каналах. Первое – это появление дополнительного локального максимума в компенсационном плече в период с августа по сентябрь. Второе – это значительно большее отношение между максимумами в декабре и мае на записях компенсационного канала по сравнению с тем же отношением в измерительном плече. Определение коэффициентов корреляции и уровня шумовой подложки может позволить выявить его природу и

прогностическую ценность при нарушении его периодичности.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведен анализ нестационарности микродеформационного шума на протяжении года на основе экспериментальных данных лазерных деформографических измерений, полученных за период с 1994 г. по настоящее время. В результате анализа суточной повторяемости возбуждения в сигналах, регистрируемых лазерным деформографом в

диапазоне периодов 20–40 с, выявлено наличие нескольких областей локализации максимумов амплитуды регистрируемого сигнала. При этом если у одного максимума меняется в течение года только амплитуда, то у другого меняется как амплитуда, так и его положение во времени.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [2] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [3] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Jul 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P.567-574.
- [4] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. Proc. of: 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Jul 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P. 615-622.
- [5] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227–234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [6] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491–498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [7] 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. 45(4), P. 97-100.
- [8] V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations // Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC – 2012), P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.

- [9] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometria). 2003. 39(2), P. 43-47.
- [10] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.

### Юрий Николаевич Фомин

Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СИФ ФИЦ ЕГС РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, начальник сектора, (383) 333 38 41, E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**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



**Владим Михайлович Семибаламут** – к.ф.-м.н., директор Сибирского филиала Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук», Новосибирск, Россия.  
E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)



**Терешкин Денис Олегович** Сибирский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (СИФ ФИЦ ЕГС РАН), 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, ведущий электроник, (383) 333 38 41, E-mail: [denis@kasan.ws](mailto:denis@kasan.ws)

### Сергей Владимирович Панов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук, 630090, Россия, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 13-3, старший научный сотрудник, (383) 333 30 72, E-mail: [iss@laser.nsc.ru](mailto:iss@laser.nsc.ru)



Д.т.н. **Любомир Димитров** –  
 Профессор, Технический  
 университет Софии,  
 машиностроительный факультет,  
 Болгария. Области интереса:  
 мехатроника, адаптивное и  
 оптимальное управление,  
 интеллектуальные системы  
 диагностики и управления,  
 MEMS.  
 E-mail: [lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg)

Статья поступила 16.01.2019.

## Analysis of the signal of the earth crust strain gauge in the Baikal rift zone

Yu.N. Fomin<sup>1</sup>, V.A. Zhmud<sup>2,3</sup>, V.M. Semibalamut<sup>1</sup>, D.O. Tereshkin<sup>1</sup>, S.V. Panov<sup>3</sup>, L.V. Dimitrov<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup> Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup> Institute of Laser Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia

<sup>4</sup> Technical University Sofia, Sofia, Bulgaria

*Abstract:* From 1994 to the present, records of deformations of the Earth's crust, which are measured by a laser displacement gauge, called a deformograph, are regularly recorded. This meter records changes in the distance between the mirrors fixed on the rock inside the gallery in two directions: North-South and West-East. Such observations are carried out in the Gorny Altai region, in Kazakhstan and near Lake Baikal. One of the long-acting deformographs is installed in the gallery of the Talaya seismic station in the Baikal Rift Zone (RHL). Records of deformations (deformograms) are analyzed to study the processes in the Earth's crust and to identify the forerunner of earthquakes. In 2016, work was done on systematization of digital records of the deformation process for the period from 1994 to 2016. A digital catalog has been compiled giving a general idea of the material available for processing. Records for 2016 are analyzed in detail. This article reports the most interesting results of this analysis.

*Key words:* information processing, laser physics, earthquake precursors, accuracy, filtration

### REFERENCES

- [1] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Taichenachev, A. Modification of optoelectronic intellectual systems for absolute measurements in monitoring of earth seismic dynamics. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 999-1004.
- [2] Zhmud, V., Semibalamut, V., Dimitrov, L., Fomin, Y. The increase of the accuracy of the laser-based measurement of ultra-low tidal deformation of rocks. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM. 2017. 17(21), P. 1069-1076.
- [3] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Optoelectronic Intellectual Systems for Monitoring of Earth Seismic Dynamics: Results and Developing Directions. Proc. of 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016): Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P.567-574.
- [4] Zhmud, V.; Semibalamut, V.; Dimitrov, L.; et al. Software Structure for the Laser Sensor of Earth Crust Lunar-Solar Tide Deformations. Proc. of: 16th International Multidisciplinary Scientific Geoconference (SGEM 2016). Albena, Bulgaria: Jun 30-Juel 06, 2016. International Multidisciplinary Scientific GeoConference-SGEM. Vol. III. P. 615-622.
- [5] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. Heterodyne Signal Filtering for Laser Measuring Systems. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 227–234. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [6] V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov, A.V. Taichenachev. The Phase Locking System for the Frequency Locking of Lasers for Geoinformatics. 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference "Informatics, Geoinformatics and remote sensing" SGEM 2018. Conference proceedings. Vol.18. Issue 2.2. Informatics, Geoinformatics. Albena, Bulgaria. P. 491–498. ISBN 978-619-7408-40-9. ISSN 1314-2704. DOI: 10.5593/sgem2018/2.2.
- [7] 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. 45(4), P. 97-100.
- [8] V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin. Modelling Researches of the limitations for Fault-Tolerance Measurements of Ultra Small Displacements and Vibrations // Proceedings of the Asian Conference on Modelling, Identification and Control (ASIA-MIC – 2012), P.1-11, DOI:10.2316/P.2012.769-026.
- [9] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Method of sensitivity rise of laser vibrometers. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing (Avtometriya). 2003. 39(2), P. 43-47.

- [10] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260 – 264.

**Yury N. Fomin**

Siberian Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences" (SIBGSRAS), Chief of Laser sector, 630090, Novosibirsk, pr. Ak. Lavrentieva 13/3, D. Sc., phone (383)333-38-41  
E-mail: [fominy@mail.ru](mailto:fominy@mail.ru)



**Vadim 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



**Vladimir Semivalamut** – PhD, Director of Siberian Branch of the Federal Research Center United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)



**Denis O. Tereshkin**

Siberian Branch of the Federal Research Center "United Geophysical Service of the Russian Academy of Sciences (SIBGSRAS), prosp. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, engineer, phone (383)330-38-41.

E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)

**Sergei V. Panov**

Institute of Laser Physics of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences RAS, pr. Lavrentieva 13/3, Novosibirsk, 630090, Senior Scientific worker, phone (383)333-30-72

E-mail: [lss@laser.nsc.ru](mailto:lss@laser.nsc.ru)



Dr. of Techn. Sci. **Lubomir Dimitrov.**

Full Professor.  
Technical University of Sofia,  
Faculty of Mechanical Engineering,  
Bulgaria

Mechatronics, Adaptive and optimal control, Intelligent diagnostic and control systems, MEMS.

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

The paper was received on 16.01.2019.

## **V. Информационные технологии.**

### **Содержание раздела:**

- ◇ Кулдашов О.Х., Мамарозиков Ф.Д., Муминов Ж. Распространение информационных и шумовых импульсных сигналов в оптическом волокне при защите информации. Ташкентский университет информационных технологий, Ферганский филиал, Республика Узбекистан. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 1 (27). С. 110–117.

# Распространение информационных и шумовых импульсных сигналов в оптическом волокне при защите информации

Кулдашов О.Х., Мамарозиқов Ф.Д., Муминов Ж.

Ташкентский университет информационных технологий, Ферганский филиал, Республика Узбекистан

*Аннотация:* Выявлено, что одним из основных требований, предъявляемых к современным волоконно-оптическим системам передачи информации, является обеспечение их защищенности от несанкционированного доступа. Предложена имитационная модель устройства для защиты информации от несанкционированного доступа в волоконно-оптической линии связи. Приведены временные диаграммы распространения информационных и шумовых оптических импульсов в оптическом волокне. Обоснована возможность выделения информационных сигналов из суммарного сигнала, полученного путем смешивания шумовых и информационных сигналов.

*Ключевые слова:* защита информации, несанкционированный доступ, оптическое волокно, оптическое зашумление, модель, временные диаграммы, распространение оптического излучения.

## ВВЕДЕНИЕ

Волоконно-оптические системы связи находят широкое применение для передачи больших объемов информации на значительные расстояния. Одним из основных требований, предъявляемых к современным волоконно-оптическим системам передачи информации, является обеспечение их защищенности от несанкционированного доступа [1, 2].

Методам и средствам защиты информации в ВОЛС посвящены много работ [3–7], в том числе в работе [8] для защиты информации контролируют величину неоднородности распространения по кабелю электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне, который вводят в волноводный канал с постоянным по длине волновым сопротивлением, выполненный в виде электропроводящей оболочки, охватывающей по крайней мере один электронный проводник, расположенный вдоль волокон, а о наличии несанкционированного доступа к передаваемой по волокнам информации судят по изменению величины неоднородности распространения электромагнитного излучения в радиочастотном диапазоне.

Для защиты информации в волоконно-оптических линиях связи широко применяется метод зашумления оптического сигнала в тракте передатчика, на передающей стороне в нем формируют суммарный сигнал путем смешивания шумовых и информационных сигналов и вводят в волоконно-оптическую линию связи, а на приемной стороне волоконно-оптической линии связи из принятого оптического излучения выделяют информационный сигнал.

## 1. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

### 1.2. Моделирование устройства для защиты информации от несанкционированного доступа в волоконно-оптической линии связи

Нами предложена имитационная модель устройства (Рис. 1.) который состоит из следующих основных элементов:

Источник данных, генератор случайных целых чисел – *Random-Integer (Communications Blockset/Random Data Sources)*, вырабатывающий числа в интервале от 0 до  $N-1$ . Выход генератора нужно сделать в виде кадра из  $K$  чисел.

Кодер Рида-Соломона – *RS encoder (Communications Blockset/Block)*. Он по сообщению  $K$  формирует передаваемый код из  $N$  символов.

Декодер Рида-Соломона – *RS decoder (Communications Blockset/Block)*, имеющий два выхода. На верхнем выходе из принятого кода  $R$  формируется декодированное сообщение, на нижний выход выводится кратность исправленных ошибок.

Сумматор *Sum (Simulink/Math Operation)*. В нем осуществляется смешивание шумового и информационного сигнала и выделение информационного сигнала.

Блоки *Unbuffer (Signal Processing Blockset/Buffers)* преобразуют кадры в линейные последовательности, направляемые к виртуальному двухходовому наблюдателю *Scope*.

Наблюдатель *Scope (Simulink/Sinks)* позволяет в общем масштабе времени наблюдать сигналы от блоков *Buffer*.

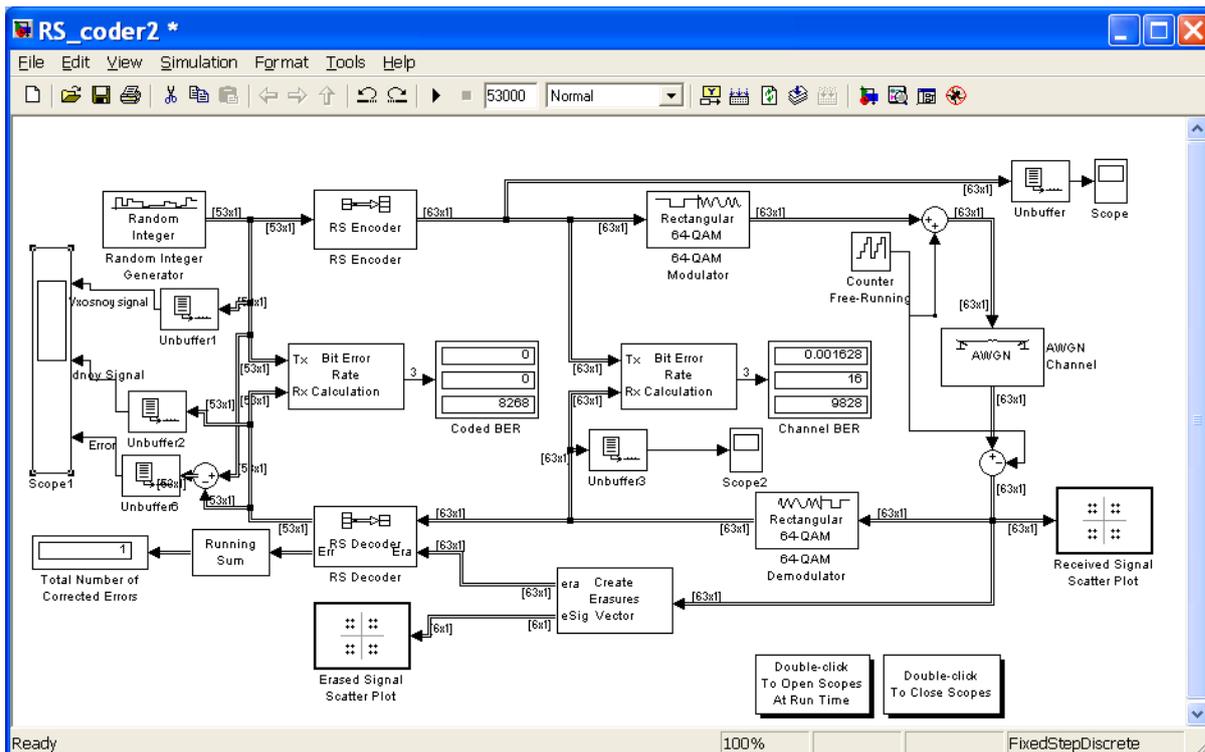


Рис. 1. Имитационная модель устройства

ВОЛС по которому передается информационный сигнал со стороны приемника информации облучается шумоподобным оптическим сигналом, который распространяется по всю длину волоконно-оптической линии связи в обратном направлении информационного сигнала. Таким образом, в ВОЛС сформируется смещенный сигнал состоящего из информационного сигнала и шумоподобного

сигнала. Поэтому при несанкционированном съеме информации из любого участка ВОЛС злоумышленниками полученный сигнал будет смещенным сигналом и не поддается к выделению информационного сигнала из смешанного сигнала из-за неизвестности характера изменения шумоподобного сигнала.

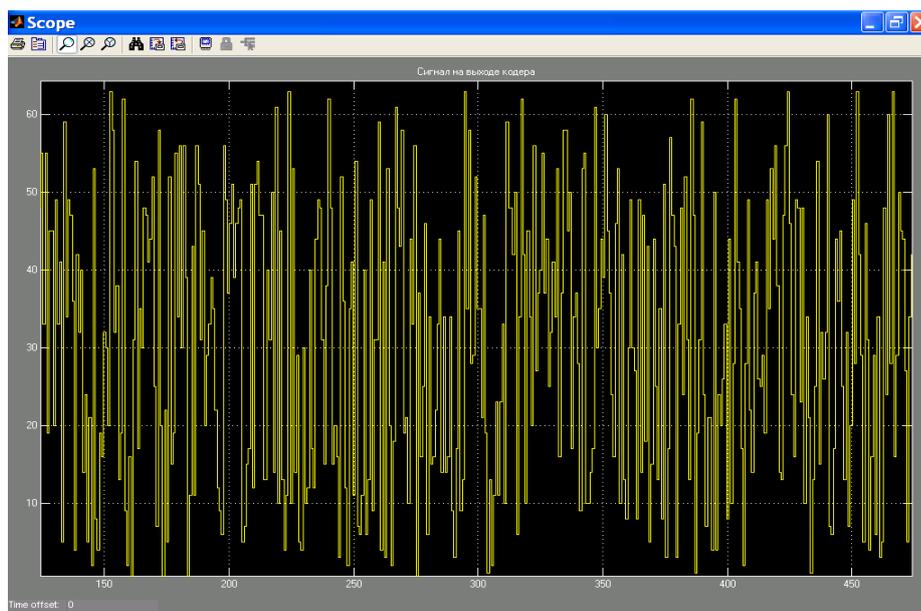


Рис. 2. Сигнал на выходе кодера

В приемной стороне волоконно-оптической линии связи шумоподобный сигнал в смешанном сигнале компенсируется с одним и тем же шумоподобным сигналом, который облучается волоконно-оптической лини связи.

В результате сложения обоих компонентов оптического сигнала, принимаемый сигнал становится практически не распознаваемым, результаты моделирования приведены на *Рис. 2*.

### 1.2. Распространение информационных и шумовых импульсных сигналов в оптическом волокне

Передача информационных и шумовых импульсных сигналов в оптическом волокне может быть осуществлена двумя режимами – асинхронным и синхронным. Кроме того, передача информационного и шумового сигнала через оптическое волокно может быть однонаправленным и двунаправленным. При однонаправленной передаче информационные и шумовые оптические сигналы вводятся через один и тот же конец оптического волокна, в котором оба сигнала имеют одинаковое направление распространения в оптическом волокне.

Противоположный режим распространение информационных и шумовых сигналов в волоконно-оптической лини связи, обеспечивается введением по отдельности информационного и шумового оптического излучения с противоположных концов ВОЛС, в котором информационный и шумовой оптический сигнал имеют противоположное направление распространения по оптическому волокну.

Для этого на противоположных концах оптического волокна, устанавливается оптический направленный ответвитель.

Блок схема экспериментальной установки для исследования противоположного режима распространение информационных и шумовых сигналов в оптическом волокне, приведена на *Рис. 3*. Здесь: 1 – генератор импульсов информационного сигнала; 2 – усилитель информационного сигнала; 3 – лазерный излучатель информационного сигнала; 4 – первый направленный ответвитель; 5 – оптический волокно; 6 – второй направленный ответвитель; 7 – лазерный излучатель шумового сигнала; 8 – усилитель шумового сигнала; 9 – генератор шумового сигнала; 10 – первый усилитель фотоэлектрического сигнала; 11 – первый фотоприемник; 12 – второй фотоприемник; 13 – второй усилитель фотоэлектрического сигнала; 14 – двухлучевой осциллограф.

Принцип действия экспериментальной установки заключается в следующем: Генератор информационных сигналов 1 вырабатывает последовательность информационных импульсных сигналов, которые усиливаются по амплитуде на усилителе информационных сигналов 2, и подаются на вход лазерного излучателя информационных сигналов 3.

Последний, преобразует импульсные электрические информационные сигналы в пропорциональные ему импульсные оптические излучения. Генератор шумовых сигналов 9, вырабатывает последовательность шумовых импульсных сигналов, которые усиливаются по амплитуде на усилителе шумовых сигналов 8, и подаются на вход лазерного излучателя шумовых сигналов 7. Последний, преобразует импульсные электрические шумовые сигналы в пропорциональные ему импульсные оптические излучения. Сформированное информационное оптическое излучение фокусируется на вход первого порта P11, первого направленного ответвителя 4. Тогда на основе (3) для выходящих оптических излучений из первого направленного ответвителя можно написать:

$$P_{0SP11} = P_{0S P12} + P_{0S P13} \quad (4)$$

или

$$P_{0S P12} = P_{0S P13} = \frac{1}{2} P_{0S P11}, \quad (5)$$

где:  $P_{0SP11}$ - мощность оптического излучения информационного сигнала на входе порта P11, первого направленного ответвителя;  $P_{0SP12}$  - мощность оптического излучения информационного сигнала на выходе порта P12, первого направленного ответвителя;  $P_{0SP13}$  - мощность оптического излучения информационного сигнала на выходе порта P13 первого направленного ответвителя;

Тогда мощность оптического излучения информационного сигнала на входе «А» оптического волокна:

$$P_{SA} = P_{0S P12} = \frac{1}{2} P_{0S P11} \quad (6)$$

Поэтому мощность оптического излучения информационного сигнала, поступающая на конец «В» оптического волокна ОВ:

$$P_{SB} = P_{SA} e^{-\alpha L} \quad (7)$$

При этом мощность оптических излучений информационного сигнала на соответствующих выходах второго направленного ответвителя согласно с (5)

$$P_{SP21} = P_{SP24} = \frac{1}{2} P_{SB} = \frac{1}{2} P_{SA} e^{-\alpha L} \quad (8)$$

или на основе (6)

$$P_{SP21} = P_{SP24} = \frac{1}{4} P_{0SP11} e^{-\alpha L}, \quad (9)$$

где:  $P_{SP21}$  - мощность оптического излучения информационного сигнала на выходе порта P21, второго направленного ответвителя;  $P_{SP24}$  - мощность оптического излучения информационного сигнала на выходе порта

P24, второго направленного ответвителя;  $P_{SP22}$  - мощность оптического излучения информационного сигнала на входе порта P22, второго направленного ответвителя;  $P_{SB}$  - мощность оптического излучения информационного сигнала на выходе конца «В» оптического волокна;

Таким образом, на чувствительную площадь второго фотоприемника ФП2 воздействует оптическое излучение информационного сигнала с мощностью

$$P_{SP24} = \frac{1}{4} P_{OSP11} e^{-\alpha L} \quad (10)$$

Аналогично для мощностей оптических излучений шумового сигнала, которые достигают на конец «А» можно написать

$$P_{NA} = P_{NB} e^{-\alpha L} \quad (11)$$

где:  $P_{NB}$  - мощность оптического излучения шумового сигнала на входе «В» оптического волокна.

Тогда мощность оптических излучений шумового сигнала на соответствующих выходах первого направленного ответвителя согласно с (5)

$$P_{NP11} = P_{NP14} = \frac{1}{2} P_{NP12} = \frac{1}{2} P_{NA} \quad (12)$$

или на основе (9)

$$P_{NP11} = P_{NP14} = \frac{1}{2} P_{NB} e^{-\alpha L} = \frac{1}{4} P_{ONP21} e^{-\alpha L} \quad (13)$$

где:  $P_{NP11}$  - мощность оптического излучения шумового сигнала на выходе порта P11, первого направленного ответвителя;  $P_{NP14}$  - мощность оптического излучения шумового сигнала на выходе порта P14, первого направленного ответвителя;  $P_{ONP21}$  - мощность оптического излучения шумового сигнала на входе порта P21, второго направленного ответвителя.

Таким образом на чувствительную площадь первого фотоприемника П1 воздействует оптическое излучение шумового сигнала с мощностью

$$P_{NP14} = \frac{1}{4} P_{ONP21} e^{-\alpha L} \quad (14)$$

Из вышеизложенного следует, что в конце «В» оптического волокна уровень информационного сигнала меньше чем уровни шумового сигнала, отношение которых зависит от длины оптического волокна  $L$  и его коэффициента затухания  $\alpha$ . Когда начальные мощности

информационного и шумового сигналов равны т.е.  $P_{OSP11} = P_{ONP21}$  и при использовании идентичных направленных ответвителей имеем  $P_{NB} = P_{SA}$ . По этому отношение мощностей информационного и шумового сигналов может быть определены как.

$$P_{NB} / P_{SB} = e^{\alpha L} \quad (15)$$

Известно что для гарантированного защиты информации при использовании шумоподобного сигнала в конце волоконно-оптической линии связи уровень мощностей информационного и шумового сигналов должно быть одинаковые т.е.  $P_{NB} = P_{SB}$ . По этому для выполнения этой условия минимальный уровень мощности шумового сигнала в конце «В» оптического волокна должно быть

$$P_{minNB} = P_{NB} e^{\alpha L} \quad (16)$$

или

$$P_{minONP21} = 2 P_{NB} e^{\alpha L} = 2 P_{SA} e^{\alpha L} = P_{OSP11} e^{\alpha L} \quad (17)$$

Таким образом для надежную зашумление информационного сигнала по все длине линейного тракта оптического волокна минимальная мощность начального шумового сигнала должно быть больше на  $e^{\alpha L}$  по сравнению с начальной мощности информационно сигнала.

Соответствующее измерение и наблюдение формы параметров информационного и шумового фотоэлектрических сигналов производилось с помощью двухлучевого осциллографа типа С1-83.

Для одновременного измерение и наблюдение формы информационных и шумовых фотоэлектрических сигналов на выходе первого направленного ответвителя были использованы порты P14 и P13, а на выходе второго направленного ответвителя - P24 и P23.

В качестве источника излучений информационного и шумового сигнала был использован лазерный излучатель типа ИЛПН 301-1, в качестве фотоприемников был использован фотодиод на основе кремния ФД-290.

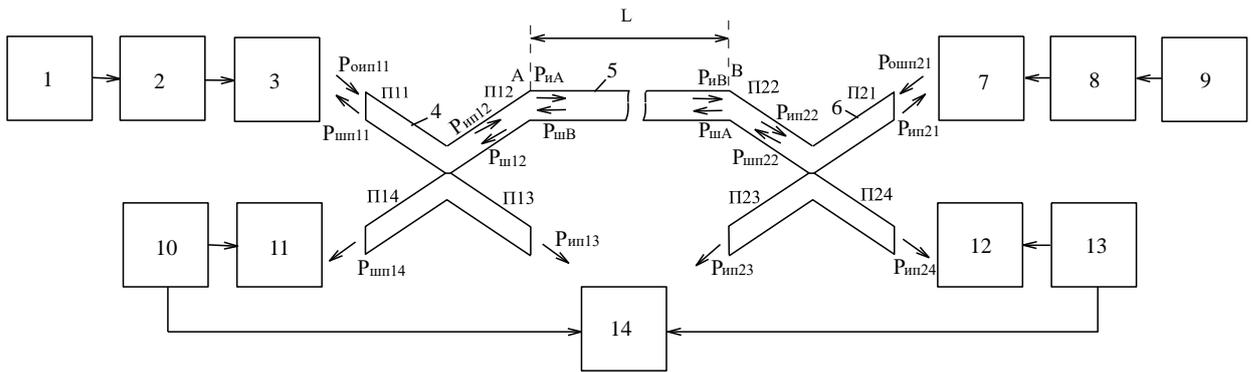
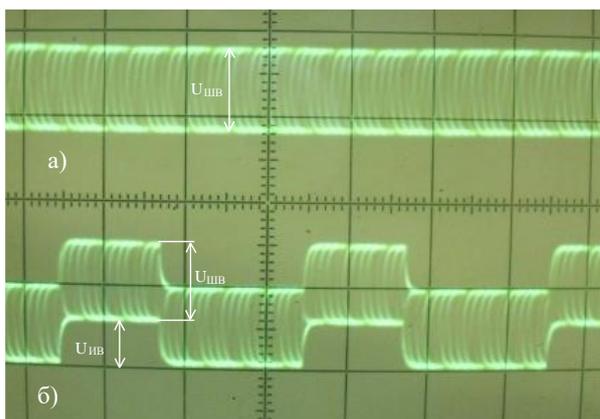


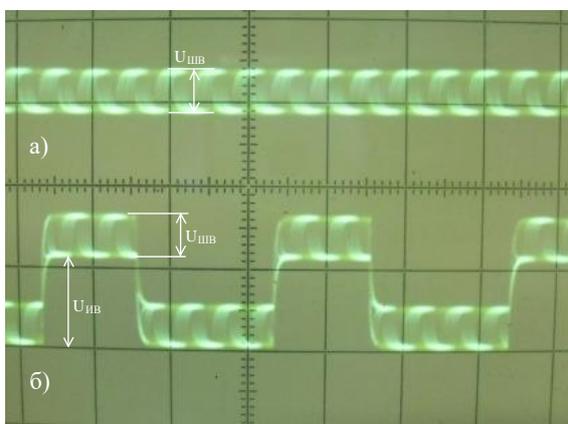
Рис.3. Блок схема экспериментальной установки для исследования противоположного режима распространения информационного и шумового сигнала в оптическом волокне

Осциллограммы формы напряжений фотоэлектрического сигнала соответствующему мощности информационного и шумового сигнала в конце «В» оптического волокно приведены на *Рис. 4*. Здесь: а) - шумовой фотоэлектрический сигнал; б) - суммарный информационный и шумовой фотоэлектрический сигнал.

Из осциллограммы формы напряжений фотоэлектрического сигнала видно, что амплитуда шумового фотоэлектрического сигнала  $U_{ШВ}$  намного больше чем амплитуды  $U_{ИВ}$  информационного фотоэлектрического сигнала. Который обеспечивает надежную зашумление информационного сигнала. На *Рис. 5* показан осциллограммы формы напряжений фотоэлектрического сигнала соответствующему мощности информационного и шумового сигнала в конце «А» оптического волокно. Здесь: а) - шумовой фотоэлектрический сигнал; б) - суммарный информационный и шумовой фотоэлектрический сигнал.



*Рис. 4.* Осциллограммы фотоэлектрических сигналов информационного и шумового сигнала в конце «В» оптического волокно



*Рис. 5.* Осциллограммы фотоэлектрических сигналов информационного и шумового сигнала в конце «А» оптического волокно

Из *Рис. 5* видно, что амплитуда информационного фотоэлектрического сигнала

$U_{ИА}$  намного больше, чем амплитуды шумового фотоэлектрического сигнала  $U_{ША}$ , который снижает надежность зашумление информационного сигнала. Именно поэтому минимальная мощность начального шумового сигнала в конце «В» оптического волокно должно быть определены из выражения (17).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена имитационная модель устройства для защиты информации от несанкционированного доступа в волоконно-оптической линии связи.

Разработана блок схема экспериментальной установки для исследования противоположного режима распространения информационных и шумовых сигнала в оптическом волокне.

Приведены временные диаграммы распространения информационных и шумовых оптических импульсов в оптическом волокне.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Jensen T., Skjoldstrup B., 1 OGBit/s Optical Transmission Technology. Teleteknik. 1995, 39, № 2, p. 65-78.
- [2] А. В. Корольков, И. А. Кращенко, В. Г. Матюхин, С. Г. Синев. Проблемы защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи, от несанкционированного доступа. Информационное Общество, 1997 г., № 1.
- [3] А. Манько, В. Катоков, М. Задорожный. Защита информации на волоконно-оптических линиях связи от несанкционированного доступа. Правовые нормативные материалы обеспечения системы защиты в Украине. вып. 2, 2001.
- [4] К.Е.Румянцев, И.Е.Хайров. Защита информации, передаваемой по светодиодным линиям связи. Информационное противодействие угрозам терроризма: научн-практ. Журн. ФГПУ НТЦ, Москва. 2004, № 2. С. 27–32.
- [5] Малюк А.А. Информационная безопасность: Концептуальные и методологические основы защиты информации. М.: Горячая линия Телеком, 2004. – 2766 с.
- [6] Корольков, И.А. Кращенко, В.Г. Матюхин, С.Г. Синев Проблемы защиты информации, передаваемой по волоконно-оптическим линиям связи, от несанкционированного доступа. Информационное общество, 1997, вып. 1, с. 74–77.
- [7] Рахимов Н.Р., Трушинин В.А., Бакушин Д.И., Кнутов В.А. Современные методы разработки информационной безопасности ВОЛС. Автоматика и программная инженерия. 2015, №2. С. 85–88.
- [8] А. В. Боос, О. Н. Шухардин. Анализ проблем обеспечения безопасности информации, передаваемой по оптическим каналам связи, и путей их решения. Информационное противодействие угрозам терроризма: научн-практ. журн. ФГПУ НТЦ, Москва. 2005, №5. С. 172180.



**Оббожон Хокимович Куддашов**  
— к.т.н, доцент, кафедры  
Телекоммуникация инжиниринг  
Ферганского филиала  
Ташкентского университета  
информационных технологий,  
Республика Узбекистан,  
г.Фергана, ул.Мустакиллик 185.  
E-mail: [kuldashov.abbos@mail.ru](mailto:kuldashov.abbos@mail.ru).



**Жасурбек Мамиржонович Муминов** — ст.преподаватель,  
кафедры «Профессиональное образование» Ферганского филиала Ташкентского университета информационных технологий, Республика Узбекистан, г.Фергана, ул.Мустакиллик 185.



**Фозилжон Давронбоевич Мамарозиков** — ст.преподаватель, кафедры «Языки» Ферганского филиала Ташкентского университета информационных технологий, Республика Узбекистан, г.Фергана, ул.Мустакиллик 185.

Статья получена 18.02.2019

UDC 621.391

## Distribution of Information and Noise Pulse Signals in the Optical Fiber During Protection of Information

O.Kh. Kuldashov, , F.D. Mamarozikov, J.Muminov

Fergana branch of the Tashkent University of Information Technologies, Republic of Uzbekistan, Fergana

*Annotation* - It was revealed that one of the main requirements for modern fiber-optic information transmission systems is to ensure their protection from unauthorized access. A simulation model of a device for protecting information from unauthorized access in a fiber-optic communication line is proposed. The time diagrams of the propagation of information and noise optical pulses in an optical fiber are given. The possibility of extracting information signals from the total signal obtained by mixing noise and information signals is substantiated.

*Key words:* information protection, unauthorized access, optical fiber, optical noise, model, timing diagrams, optical radiation propagation.

### REFERENCES

- [1] Jensen T., Skjoldstrup B., 1 OGbit/s. Optical Transmission Technology. Teletechnik, 1995, 39, N. 2, p. 65-78.
- [2] A. V. Korolkov, I. A. Krashchenko, V. G. Matyukhin, S. G. Sinev. Problems of protecting information transmitted via fiber-optic communication lines from unauthorized access. Information Society, 1997, N 1.
- [3] A. Manko, In the Skating Rink, M. Zadorozhny. Information protection on fiber-optic communication lines from unauthorized access. Legal normative materials to ensure the protection system in Ukraine. vol. 2, 2001.
- [4] K.Ye. Romyantsev, I.Ye.Hairov. Protection of information transmitted via LED communication lines. Information countering threats of terrorism: scientific-practical. Log. FGPU NTC, Moscow. 2004, №2. P. 27–32.
- [5] Malyuk A.A. Information security: Conceptual and methodological foundations of information security. . - M .: Telecom Hotline, 2004. - 2766 sec.
- [6] Korolkov, I.A. Kraschenko, V.G. Matyukhin, S.G. Sinev Problems of protection of information transmitted via fiber-optic communication lines from unauthorized access. Information Society, 1997, no. 1, s. 74-77.
- [7] Rakhimov N.R., Trushinin V.A., Bakushin D.I., Knutov V.A. Modern methods of developing information security fiber optic links. Automatics and software engineering. 2015, №2. P. 85–88.
- [8] A. V. Boos, O. N. Shukhardin. Analysis of the problems of ensuring the security of information transmitted via optical communication channels and ways to solve them. Information countering the threats of terrorism: Scientific-practical. Journ. FGPU NTC, Moscow. 2005, №5. Pp. 172180.



**Obbozhon Khokimovich Kuldashov** - Ph.D., associate professor, department Telecommunications engineering of the Fergana branch of the Tashkent University of Information Technologies, Republic of Uzbekistan, Fergana, Mustakillik St. 185.  
E-mail: [kuldashov.abbos@mail.ru](mailto:kuldashov.abbos@mail.ru).



**Foziljon Davronboevich Mamarozikov** - senior lecturer, department "Languages" of the Fergana branch of the Tashkent University of Information Technologies, Republic of Uzbekistan, Fergana, Mustakillik st. 185.



**Zhasurbek Muminov** - senior lecturer,  
"Professional education"  
departments of the Fergana branch  
of the Tashkent University of  
Information Technologies, Republic  
of Uzbekistan, Fergana, Mustakillik  
185.

The paper was received on 18.02.2019

## **VI. Инструментарий теории замкнутых динамических систем для физических и технических наук. Дискуссии. К сведению авторов.**

### **Содержание раздела:**

- ◇ А.В. Ляпидевский, В.А. Жмудь, О.Н. Долинина, Л.В. Димитров. Концепция умного дома: безопасность, дополнительные возможности и дополненная реальность. ПАО «Новосибирский институт программных систем», Новосибирск, Россия. Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия. Саратовский государственный университет им. Гагарина А.Ю., Саратов, Россия. Технический университет Софии, София, Болгария. Автоматика и программная инженерия. 2019. № 4 (26). С. 119–128.
- ◇ Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия». С. 129–133.

# Концепция умного дома: безопасность, дополнительные возможности и дополненная реальность

А.В. Ляпидевский<sup>1</sup>, В.А. Жмудь<sup>1,2</sup>, О.Н. Долинина<sup>3</sup>, Л.В. Димитров<sup>4</sup>

<sup>1</sup>ПАО «Новосибирский институт программных систем», Новосибирск, Россия

<sup>2</sup>Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия,

<sup>3</sup>Саратовский государственный университет им. Гагарина А.Ю., Саратов, Россия.

<sup>4</sup>Технический университет Софии, София, Болгария

*Аннотация:* В статье обсуждаются технологии умного города, интернета вещей, виртуальной и дополненной реальности. Показано, что требуется централизованное планирование развития этих технологий. Дается анализ отдельных направлений и классификация их по важности, также предлагается классификация по готовности к внедрению и по потенциальному эффекту.

*Ключевые слова:* технологии умного города, интернет вещей, smart city technologies, internet of things, высшее образование, магистратура, мобильность, автоматика, мехатроника, робототехника, информационные технологии

## ВВЕДЕНИЕ

Тематика умного жилища и дополненной реальности, а также интернета вещей стала в последнее время особо актуальной [1–5].

Концепция умного дома и умного города в последнее время стала часто использоваться как модное и новое направление, преимущественно для подчеркивания инновационных свойств не столько новых идей (которых не так уж и много), сколько авторских коллективов, претендующих на особое отношение, финансирование из соответствующих грантов и тому подобное.

Ситуация такова, что встретить словосочетание «Умный город» или «Умный дом» можно намного чаще, нежели найти новую и полезную информацию о том, что эти названия под собой скрывают, где это фактически реализовано, насколько оправдана подобная терминология и т.п.

Зачастую оснащение многоквартирного дома интернет сетью, видео наблюдением или отдельными мусоросборниками выдается за концепцию умного города в действии, а таковая концепция уже претендует на реализацию умного города. В публикациях или публичных выступлениях добавляется энергосбережение, альтернативные источники энергии, экологические (в меру понимания этого термина авторами) технологии, называемые зелеными.

На наш взгляд, подобные новшества не имеют никакого отношения к принципиально новому подходу, который ожидается при введении новой (иной) терминологии, такой как умный дом.

Прежде всего, определим целевую аудиторию таких домов, критические признаки, по совокупности которых дома можно

классифицировать как умные, после чего можно будет рассуждать о технологиях.

Если крыша дома покрыта термобатареями, это еще не делает дом умным. Если стиральная или посудомоечная машина оснащена таймером, по которому ее запуск можно осуществить в ночное время, когда, возможно, тарифы на электроэнергию несколько ниже, или телевизор программируется на выключение через час после его работы или через некоторый период заданный срок, когда пульт остается в бездействии, если в подъезде освещение включается по детектору движения или звука, а выключается по таймеру, отмеряющему время, когда таковые детекторы не регистрируют движения или звука – это не умный дом, это просто набор простых решений, на уровне конечных автоматов, не требующие никакого интеллекта, даже примитивнейшего варианта микроконтроллера, хотя, безусловно, можно все эти функции реализовать на компьютере с относительно большими вычислительными возможностями. Но ведь если гвоздь забивается логарифмической линейкой, процесс забивания гвоздя не станет более интеллектуальным по сравнению с тем, когда его забивают молотком. Вышеперечисленные функции могут быть решены простейшими автоматами с простейшими датчиками, говорить об интеллекте здания в этом случае нет оснований.

Адаптация возможностей и конкретных функций жилища к потребностям жильца также еще не является признаком интеллекта жилища, хотя это, безусловно, ближе к рассматриваемой тематике. Но ведь можно регулировать длину брючного ремня, ручки сумки, швабры, кистля и т. п., эта примитивная адаптация не является интеллектуальной при всем удобстве этих регулировок, которые настолько привычны, что иного мы уже и не представляем.

Даже если кровать вдвигается в стену или складывается, трансформируется в диван или уходит под стол, или трансформируется в своеобразный помост – все это всего лишь электромеханические решения (трансформации мебели) для экономии места, что крайне важно для малогабаритных квартир, но при всей важности и оригинальности еще не является признаком интеллекта жилища. Трансформация конференц-зала из одного большого в три небольших – это тоже полезное, но не слишком интеллектуальное решение.

По-видимому, умное жилище – это и не кухня, оснащенная автоматическими кофеварками, посудомоечными машинами, СВЧ печью и холодильником, способным информировать о заканчивающихся продуктах питания и даже сделать заказ в магазин на их пополнение.

### 1. КОНЦЕПЦИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО ЖИЛИЩА

Термин «компьютерный интеллект» применяется, по-видимому, на практике гораздо чаще, чем для этого имеются действительные основания. Возможно, в настоящее время примеров, в полной мере отвечающих этому понятию, так и не появилось. Наиболее близко к этому понятию приближается компьютер, совершающий анализ ситуации и принимающий решения, хотя бы даже и по самым простейшим алгоритмам.

Пожалуй, образец «умного действия» жилища был показан в фантастическом фильме «Пятый элемент», где после падения на пол стеклянного бокала с коктейлем из ниши появились несколько роботов-уборщиков, один собрал осколки стекла, другой ликвидировал пятна от коктейля, третий переплавил стекло в стакан точно такой же формы, и четвертый, скрытый внутри стола, приготовил новый коктейль, идентичный тому, который был в разбившемся бокале. После этого новый бокал с коктейлем был подан жильцу на его стол (в правильное место на столе).

Из этого примера можно сформулировать идеальные функции умного жилища:

1. Идентификация проблемы.
2. Решение проблемы.

Полное решение проблемы распадается на устранение наиболее явной и наиболее остро мешающей ее части; определение необходимости и возможности окончательного устранения проблемы до мельчайших деталей; выполнение функции окончательного устранения при возможности.

В рассмотренном примере острая часть – устранение осколков и пятен. При отсутствии робота эту функцию все равно пришлось бы выполнять жильцу или обслуживающему персоналу. Вторая часть функций в этом примере – принятие решения о том, необходимо

ли восстанавливать исходный объект. Третья часть – восстановление исходного объекта. И скрытый аспект – в рассмотренном примере предполагается полная утилизация осколков стекла, что является фантастикой для современного уровня техники. Предположим, разбитый предмет являлся бы неким исключительно сложным объектом, это могло быть произведение искусства, например, редкий китайский фарфор, венецианское стекло, богемский хрусталь, поврежденным может оказаться ювелирное изделие с драгоценными камнями, картина известного художника и так далее. Восстановление чрезвычайно дорогих изделий предполагает наличие техники производства чего угодно, причем также и наличие техники определения первоначального состояния этого объекта по его обломкам. Таким образом, если восстановление стакана из дешевого стекла видится возможным, но не необходимым, то восстановление других предметов, более сложных и ценных, видится необходимым или крайне желательным, но едва ли возможным. Вообще иметь в доме целую фабрику по производству чего угодно невозможно не только сейчас, но, по-видимому, и в достаточно обозримом будущем. Если каждый житель может иметь дома подобное производство, это по уровню материального обеспечения граждан превышает даже мифический коммунизм, согласно концепции которого каждый будет иметь все, что ему угодно в полном соответствии с его потребностями.

Как видим, о полном устранении проблемы говорить пока не приходится.

Другой аспект состоит в ответе на вопрос: а следует ли полностью устранять проблему. Если предмет разрушен случайно, по-видимому, его восстановление могло бы быть желательным, но ведь возможно, что жилец разрушил предмет преднамеренно. Нам не требуются автоматы, которые из нарезанной моркови будут делать обратно целую морковь. Следовательно, нарушенная целостность – не обязательно проблема. Если мы распаковали подарок, разрезали ленточку, порвали упаковку, мы не ходим, чтобы разумные роботы восстанавливали статус-кво, запаковывали подарок обратно.

По-видимому, на настоящем этапе развития техники мы не готовы доверить компьютерному интеллекту решение задачи, что именно является проблемой, а что проблемой не является; в каком случае следует ликвидировать хаос, а в каком случае то, что машинный интеллект оценит как хаос, является частью задуманного нами плана действий.

Если человек среди ночи встал для неотложных дел, он не желает по возвращении обнаружить свою постель аккуратно запроваженной. Пожалуй, мы легко согласились

бы на данном этапе дать себе труд подсказать «умному жилищу», в каком случае следует ликвидировать хаос (вымыть пол или окно, заправить постель, убрать посуду и крошки со стола, вымыть посуду и так далее), а в каком случае не следует этого делать (если мы лишь ненадолго отлучились и намерены продолжить обед, на полу не грязь, а праздничное конфетти, окно покрыто не пылью, а новогодними блестками и так далее).

## 2. УМНОЕ ЖИЛИЩЕ ДЛЯ СИБАРИТА ИЛИ ДЛЯ ИНВАЛИДА?

Указанные функции также пока еще далеки от простой реализации даже в том случае, если они реализуются по команде. Робот-пылесос, холодильник с распознающей видеокамерой и посудомоечная или стиральная машина, определяющая уровень загрязнения и выбирающая режим мойки, являют собой некоторые отдельные решения отдельных проблем. Устройств для капитальной качественной уборки квартиры (тем более ремонта) еще не изобрели. Поэтому нам придется еще больше снизить уровень требований, предъявляемых к сегодняшнему умному жилищу.

Приспособление функционала жилища к нуждам инвалидов, одиноких пожилых или больных людей – это, пожалуй, та сфера, где обсуждаемые технологии наиболее востребованы.

Конечно, адаптивные возможности требуют избыточности технических решений, стоимость адаптации высока. Если закладывать возможности перестройки (адаптации) всего, что может потребоваться к изменению, потребуется оснастить все жилище большим количеством исполнительных устройств и датчиков, большинство из которых по всей вероятности не понадобится. Например, если в доме проживает глухой человек, то вместо дверного звонка придется использовать оптический сигнал вызова, также как на телефоне, на пожарной сигнализации и тому подобных устройствах оповещения. Негуманно было бы заставлять такого инвалида носить на себе оптический сигнализатор, ведь если человек не может расслабиться и освободиться от лишних нателных устройств даже дома, то это достаточно утомительно. Человек может находиться в различных помещениях, следовательно, оптические устройства срочного оповещения должны быть в каждом из них. Это и создает избыточность. Умный дом может опознавать место пребывания глухого жильца и включать оптические устройства только там, где он находится, но они все равно должны иметься повсюду, это и создает избыточность. Если мы ходим иметь возможность смотреть телевизор и в гостиной, и в спальне, и на кухне, нам придется иметь отдельный телевизор в каждом

из этих помещений или сделать так, чтобы телевизор следовал за нами из комнаты в комнату. И то и другое – избыточность, причем лишнее количество телевизоров – это более простое решение.

Если в доме проживает слепой, ему, наоборот, не нужны оптические устройства, ему необходимы звуковые и осязательные ориентиры для более свободного передвижения по квартире и отыскания необходимых вещей.

Для каждого нестандартного жильца (в особенности – инвалида или больного человека) требуются индивидуальные вспомогательные функции для облегчения быта и, возможно, труда или творчества на дому (если у него есть такая потребность). Излишне дорого было бы делать жилище, которое предоставляет все возможные функции на выбор, следовательно, требуется набор относительно эффективных решений для типовых проблем, т.е. умный дом для слепого будет отличаться от умного дома для глухого и от умного дома для инвалида по опорно-двигательной системе, как и для любого иного инвалида. Тем не менее, эти функции нельзя строго разделить на конечное количество классов, ведь инвалид по зрению может оказаться одновременно и без руки, или с ослабленным слухом и так далее. Проблемы и потребности могут сочетаться в самых разнообразных вариантах в каждом конкретном случае: у кого-то не достает одного пальца, а у другого отсутствуют все четыре конечности, но каждый член общества вправе надеяться прожить жизнь настолько полноценную, насколько это возможно при нынешнем уровне цивилизации. Когда мы говорим о научной концепции (а не об экономической возможности или целесообразности), исследуем проблему не методами бизнеса, а методами научных возможностей, нам следует ориентироваться, в том числе и на самые сложные случаи. Ведь куда важнее сделать жилище, повышающее уровень комфорта одному инвалиду, которому тяжелее всех прочих, чем обеспечить десятки или сотни сибаритов чуть более быстрым доступом в интернет, чуть более экономным режимом энергопотребления, чуть лучшим освещением, чуть более эффективным кондиционером и более рациональной организацией рабочего места. Эргономика здорового офиса, безусловно, важна, но эргономика жилища инвалида важнее тысячекратно.

В настоящее время по поиску «сотовый телефон для глухих» интернет предлагает видео с розыгрышем со скрытой камерой, где необоснованно веселый человек собирает деньги якобы на производство телефонов для глухих, видео сопровождается веселой музыкой и смехом за кадром [7]. Можно, конечно, посоветовать глухому пользоваться отправкой sms-сообщений, но это не решает проблемы.

Продуманного комплекса решений для этой проблемы нет.

Проблема сотового телефона для слепых освещена чуть более серьезно, например, предлагается примитивный телефон с озвучиванием некоторых функций и кнопок [8].

Из этого видно, что даже проблема создания хотя бы умного телефона для человека с ограниченными возможностями еще далека от совершенного решения. Поэтому о решении проблемы создания умного жилища для инвалида тем более научному сообществу пока еще по большому счету нечем хвалиться.

Вывод: функционал умного жилища должен быть гибким, подстраиваться под потребности конкретных жильцов. Использование всех возможностей в каждом жилище нерационально, возможности должны набираться из стандартных «коробочных» решений как из модулей. Эти решения должны легко объединяться в систему, т. е. они должны быть совместимы программно и аппаратно подобно тому, как примыкают друг к другу элементы конструктора LEGO.

### **3. КОНЦЕПЦИИ БЕЗОПАСНОСТИ – ТЕХНИЧЕСКИЕ И СОЦИАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ**

Рассмотрим в качестве примера проблему электронных запоров дверей.

Если дом окажется обесточенным, резервной системы электропитания нет, электронные запоры не могут полностью выполнить свои функции. Важно при этом, какое механическое решение следует предпочесть, или, проще говоря, что будет с такими запорами. Двери сейфа, по-видимому, должны оставаться закрытыми не менее надежно, входным дверям подъезда, по-видимому, в такой ситуации лучше оставаться открытыми. Но с дверьми от квартиры обстоит сложнее. Если они останутся закрытыми, это создает опасность для жильцов, например, на случай пожара, при котором вероятность обесточивания системы повышается многократно. Если же двери будут открыты, это создает благоприятные возможности для грабителей – достаточно обесточить дом, и можно войти во все двери с целью грабежа. Если же подобные двери подстраховывает обычный механический замок или в электрическом запоре имеется возможность его открыть с помощью обычного механического ключа, то в этом случае в штатном режиме такой запор либо не могут полностью эффективно выполнять свои функции, поскольку в этом случае электронного открывания двери не достаточно или электронное замыкание двери недостаточно эффективно. Следовательно, единственное приемлемое решение – исключение ситуации, когда функции, обеспечиваемые электронным запором, в какой-либо степени будут снижены. Следовательно, необходима бесперебойная

система электропитания и надежная система манипуляции питанием, т. е. требования к надежности чрезвычайно высоки. Обычное жилище должно функционировать столь же надежно, как самолет или как военная техника, или как центр обработки данных высшего уровня. Такой результат достигается за счет несоразмерного удорожания и за счет систем мер по сохранению надежности, таких, например, как списание техники по достижению срока гарантийной бесперебойной службы даже в случае ее абсолютной исправности.

Удорожание такого жилища будет многократным. Следовательно, эта концепция пока далека от массового применения.

Социальные ограничения – это отдельный фактор, с которым нельзя не считаться.

Во-первых, имеются социальные факторы уязвимости даже безупречно защищенной системы. Под влиянием мошеннических уловок люди вследствие своей доверчивости порой сообщают сведения, утечка которых лишает их информационной защищенности.

Во-вторых, большинство граждан не готовы доверить безопасность жилища и по существу всей своей жизни системам, чья безопасность основана на запоминании нескольких десятичных цифр. Идентификация по отпечаткам пальца, сетчатке глаза и т.п. пока еще дает сбой, поэтому требует альтернативной идентификации, как, например, на *iPhone*, где она дублируется четырьмя десятичными цифрами. Такую идентификацию, по-видимому, можно взломать относительно просто. Если злоумышленник сможет воспользоваться информацией из вашего телефона, это достаточно неприятно, но если он сможет полностью воспользоваться вашим жилищем (и, по-видимому, вашими деньгами и вашей частной информацией в одном пакете), такая перспектива пугает. Требуется не только гарантировать рекордно надежную защиту, но и убедить пользователей в ее надежности.

### **4. СМЕЛЫЕ ИДЕИ ДЛЯ УМНОГО ЖИЛИЩА**

Одним из принципиальных отличий «умного» жилища должно быть, по-видимому, действительно наличие принципиально новых возможностей для его обитателей.

Рассмотрим для примера пути развития компьютеров и сопоставим их с путями развития телефонов и иных гаджетов.

На первых порах вычислительные машины были крайне примитивными, позволяли осуществлять простейшие операции. С их развитием возрастали и потребности в вычислительных мощностях. Встала задача получения чрезвычайно больших по тем временам вычислительных мощностей, которые можно было бы охарактеризовать термином «прорывные». Это можно было обеспечить лишь созданием сверхкрупных вычислительных

центров, объединяющих производительность очень большого числа машин. Впоследствии вследствие прогресса вычислительной техники появилась возможность иметь персональные компьютеры, вычислительная мощность которых стала соизмеримой с производительностью таких центров. Но дальнейший прогресс опять привел к решению, основанному на концентрации вычислительных мощностей, теперь уже на новом уровне, вследствие чего появились многоядерные машины и центры обработки данных (дата-центры, ЦОД). В настоящее время можно иметь достаточно простой компьютер, который в случае подключения к ЦОД может предоставлять достаточно много возможностей, которые много выше, чем возможности самого сложного компьютера, лишенного такой связи.

В развитии телефонии также можно усмотреть аналогичные явления. Сначала все возможности связи определялись телефонными станциями, а аппараты абонентов были предельно примитивными. Впоследствии аппараты стали усложняться, а развитие сотовой связи сделало из телефонов устройства совершенно нового типа, которые сочетают в себе возможности фотоаппаратов, видеокамер, магнитофонов, диктофонов, плееров, средств аудио и видео связи, вычислительных устройств, фактически переносимых компьютеров. Разработчики телефонов соревнуются по вычислительным возможностям, качеству указанных и других приложений, объему файловых хранилищ, качеству экранов и по многим другим параметрам. Телефоны становятся все сложнее и дороже, потеря или случайная порча телефона становится уже достаточно ощутимым нежелательным явлением, потеря личных данных также крайне нежелательна.

Ожидаемым является дальнейший этап развития, в котором функциональные возможности телефона, подключенного по скоростной беспроводной линии к мощному ЦОД, могут быть настолько больше, чем возможности любого телефона в автономном режиме, что собственные возможности телефона уже могут оказаться несущественными. Можно ожидать в некотором будущем, может быть не столь отдаленным, как кажется, что телефоны могут выродиться в достаточно примитивные гаджеты сами по себе, они будут дешевыми и легкими, основные усилия будут сосредоточены на качестве экрана и камеры и на скорости связи, а также, возможно, на защите от влаги, теплового воздействия, ударов и прочее. Остальное может оказаться несущественным. Такой «одноразовый» телефон может позволить абоненту осуществить собственную идентификацию при подключении к мощному ЦОД, после чего иметь все преимущества

использования самого лучшего телефона, которые доставляются на самый простейший гаджет, потеря которого не существенна. Этот дешевой и легко восполняемый гаджет может нести на себе лишь самые элементарные функции. После сканирования отпечатка пальца или получения кода доступа такой телефон связывается с ЦОД, и пользователь получает все возможности самого современного телефона до тех пор, пока имеется связь. Но в умном жилище – доме, квартире – связь должна быть бесплатной, высокоскоростной, надежной и бесперебойной. Поэтому нет необходимости таскать в кармане с собой все файлы сделанных фотографий и видео, как не носим мы в кармане с собой все файлы, находящиеся в нашей электронной почте или в файловом хранилище (в облачном сервисе). При необходимости мы можем открыть почту или хранилище и получить любые файлы.

От гаджета достаточно лишь наличие средств набора номера и средств отображения видео информации, а также динамик, микрофон и средство связи с ЦОД.

В настоящее время рассматриваются и такие решения, при которых спроецированная на стол клавиатура может служить как настоящая клавиатура компьютера, поскольку видеокамера определяет положение пальца на этом образе клавиатуры и воспринимает его как действия с реальной клавиатурой. То есть сама клавиатура может быть виртуальной, если мы находимся в помещении, оснащенном проектором, камерой и соответствующим программным обеспечением. Если в помещении есть динамики и микрофоны, то теоретически можно будет позвонить без телефона, или, например, использовать для этого, скажем, столешницу, любой плоский предмет, даже кусок мыла или лист белой бумаги.

Безусловно, этот крайний вариант пока не представляет собой коммерческой ценности, но простейшие и дешевые гаджеты, заменяющие дорогостоящие – это решение, которое может заинтересовать инвесторов и быть воплощенным в жизнь достаточно скоро. Преимуществ у такого решения достаточно много. Пользователь не будет бояться потерять телефон, поскольку он будет дешевым и его персонализация будет минимизирована, достаточно взять новый такой же дешевый телефон, осуществить идентификацию личности на нем, и все входящие звонки будут приходить на него, и исходящие звонки можно будет делать с него, а ранее используемый телефон превратиться в пустую болванку, которую вновь может использовать другой пользователь со своей собственной персонифицированной идентификацией. Не будет необходимости устанавливать обновление программного обеспечения, это будет делаться автоматически на ЦОД. Не будет вопроса о том, какие из

приложений следует оставить, а какие лучше удалить, чтобы высвободить побольше памяти, так как, с одной стороны, ограничения по памяти снимутся, во-вторых, приложения вообще не надо будет устанавливать, их надо будет просто открывать, все они будут иметься на ЦОД.

## 5. МЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ, УПРАВЛЯЕМЫЕ ДИСТАНЦИОННО

Уже сейчас отдельные производители соревнуются в изобретении решений, которые составляют мозаику потенциальных возможностей «умного жилища».

Дистанционно можно будет отрегулировать температуру или освещение жилища, если потребуется и проветрить помещение, впустить нужного гостя (хотя социально мы еще не готовы к тому, чтобы впускать гостей в наше отсутствие). Можно запустить стиральную или посудомоечную посуду, активизировать робота-уборщика, покормить кота или поиграть с ним с помощью луча лазерной указки, поговорить с близкими и даже пообщаться с питомцами и поощрить их. Можно полить домашние цветы, записать телевизионную программу на диск и т. д. Можно придумать и другие функции, например, разложить кровать или сервировать стол, но, по-видимому, это уже экзотика, которая в дистанционном режиме не столь уж нужна, хотя кто бы мог сказать 30 лет назад, насколько важно запустить двигатель автомобиля дистанционно с помощью пульта чтобы сэкономить несколько минут на прогреве двигателя и садиться уже в прогретую машину, а ведь без этих функций современные автомобили уже немислимы. Совсем недавно водители доверяли только механическим средствам защиты от угона машин, предпочитая разрывать электрическую цепь в секретных местах, известных только владельцу автомобиля, сейчас эти методы уже в прошлом. Поэтому возможно, что бесконтактное открывание дверей по нажатию на пульт будет столь же распространено, как в наше время бесконтактное открывание шлагбаума или гаражных ворот.

В поездках в Зальцбург по обмену в области концепции умного города можно было увидеть мусорные ящики четырех или даже пяти типов (отличающихся по цвету), для различных видов отходов. Отдельные ящики существуют уже не только просто для стекла, но различаются для бесцветного стекла и для окрашенного стекла. Выбрасывая бумажные отходы, житель современного «умного города» должен отделить от них железные скрепки и выбросить их в другой ящик. Но едва ли можно согласиться, что эти решения – это решения «умного города». Скорее это умная обуза на жителей. По-настоящему умные решения должны обеспечить автоматическую сортировку

отходов, причем не на четыре или пять групп, а на несколько десятков групп, отдельно по видам отходов. Если на улице нас ожидает пять различных мусорных контейнеров, то и дома нам надо иметь пять мусорных ведер, и выносить их все пять – достаточно хлопотно. Мы не утверждаем, что разбор мусора по категориям для облегчения его утилизации – не важная задача, но утверждаем, что по-настоящему «умное жилище» не обременяет своих жителей этими действиями, а наоборот, освобождает их от них, выполняя их автоматически. Пожалуй, холодильник, распознающий продукты, менее важен, чем утилизатор отходов, распознающий их и сортирующий самостоятельно. Действительно, мы, по-видимому, не столь уж обременены необходимостью выбора рациона питания на предстоящий день, и едва ли готовы доверить эти функции автомату, что лишало бы нас разнообразия (а если этот автомат приходится ежедневно перепрограммировать ради разнообразия питания, то пропадает смысл его существования, поскольку так же точно можно попросту отправить заказ в магазин на продукты, «умный холодильник» в данном случае является лишним промежуточным звеном). Утилизация мусора – это не та вещь, которой мы хотели бы ежедневно заниматься, в которую мы хотели бы вносить разнообразие по собственному усмотрению.

Подобный подход следует применить в целом к списку задач «умного жилища». Необходимо выделить в первую очередь именно те, которые требуют первоочередной автоматизации и автоматизация которых наиболее просто осуществляется, без существенного удорожания. Именно с этого следовало бы начинать реализацию этой концепции.

## 6. ДОПОЛНЕННАЯ РЕАЛЬНОСТЬ

Технологии будущего немислимы без дополненной реальности. Этот подход позволяет пользователю расширить возможности собственных восприятий и увидеть важные детали реальности в световом диапазоне, недоступном человеческому восприятию – в ультрафиолетовом или инфракрасном диапазоне. К этому можно добавить и тепловидение, рентгеноскопию, панорамное видение (до 360°), ультразвуковую томографию, визуализацию электрических полей, полей скорости жидкостей и газов и так далее. Именно такие технологии позволяют превратить обычный лист бумаги в экран монитора или в клавиатуру.

В настоящее время эти возможности кажутся излишествами, а их применение видится, прежде всего, в сфере компьютерных игр и индустрии развлечений. Однако, стоит вспомнить ученого-инвалида Стива Хокинга,

который, по-видимому, участвовал в написании статей даже будучи лишенным возможности набирать или диктовать текст. Даже небольшие движения глаз можно преобразовать в команды, что позволяет предоставить инвалидам дополнительные средства общения, то есть улучшить качество их жизни, в некоторых случаях даже вовлечь их в активную творческую деятельность, которая без таких средств невозможна.

Направление дополненной реальности преимущественно рассматривается в аспекте дополнительных проекций видео изображений и совмещение этих изображений с реальными изображениями действительного мира. Это позволяет, например, наложить дополнительную информацию (комментарии) на рассматриваемые экспонаты в музее, сформировать линии, позволяющие улучшить визуальные оценки размеров предметов или дальности до них и даже осуществить бесконтактные измерения. Реже обсуждаются возможности дополнительных тактильных ощущений, а формирование акустической информации используется настолько давно и широко, что не обсуждается как нечто, имеющее отношение к дополненной реальности вследствие тривиальности такого технического решения, как наушники. Также рассматриваются аспекты обмена тактильными ощущениями, например, с помощью этих технологий можно передать рукопожатие на расстоянии. Однако эти технологии могут быть использованы более простым путем с достаточно важным положительным эффектом. Речь идет о передаче информации от человека в компьютер без использования рук. Это может показаться баловством, если не вспомнить о большом количестве инвалидов, которые лишены возможности полноценного использования двух рук. Причем, существуют инвалиды, лишенные одной руки, но также и те, кто не имеет обеих рук. Этим людям крайне сложно не только общаться в компьютером, но и выполнять многие действия, которые здоровые люди делают легко. Снятие команд управления позволяет не только предоставить этим людям возможности общения с компьютером для формирования документов, рассматривания файлов или посещения сайтов. Эти возможности позволяют управлять бионическими протезами, то есть предоставить инвалидам возможности практически полноценной жизни в обществе. Умные датчики, которые позволяют снимать с кожи человека или его мышц сигналы управления протезами открывают новые возможности в этом направлении гуманитарных технических разработок.

## 7. КОНЦЕПЦИИ УМНОГО ГОРОДА

Зачастую «умный город» подменяется понятием «умный дом». Безусловно, «умный город» состоит из «умных домов», но эта концепция несколько выше по своей сути. В данном разделе «умный дом» не рассматривается.

Концепция требует выделения проблемных кластеров.

Концепция «Умный город» связана с градостроительством и управлением города. Поэтому ее можно было бы увязать с задачами архитектуры и ЖКХ, коммунальных и дорожных служб. Также через современные города проходят железные дороги, есть электротранспорт (трамваи, троллейбусы), есть неэлектрический общественный транспорт (автобусы, маршрутки, такси), есть система ГИБДД, пожарной безопасности, скорой помощи, МЧС, эвакуаторы (включая частные компании для таких услуг населению). Также примыкает по важности мониторинг состояния мостов, крупных инженерных сооружений и крупных зданий, надзор за насаждениями (для исключения их падения с причинением ущерба), надзор за стихийными торговыми точками и ларьками, надзор за крупными рекламными сооружениями и т.д.

Для создания концепции (включая дорожную карту создания) умного города требуется разработать полный список проблем, **ранжировать проблемные кластеры** по нескольким признакам:

1. **Важность с позиции безопасности** в самом высшем уровне ее понимания и важность (как и возможность) обеспечения требуемого уровня безопасности управления.

2. **Важность для нужд города** (с позиции безопасности его функционирования и потребности промышленности, транспорта, населения и т.п.).

3. **Готовность к автоматизации** (или иначе остаточная себестоимость работ по включению автоматизированной системы управления в общую интегрированную сеть), встраиваемость (совместимость) имеющихся систем управления в создаваемую гибридную систему управления УГ.

4. **Расчетная окупаемость** (сроки) вложенных затрат или иные соображения по первоочередности автоматизации каждого проблемного кластера.

5. Для каждого проблемного кластера следует выбрать или указать из уже используемых – **решение (или пакет решений)**, из готовых (включая, возможно, зарубежные варианты) или из числа возможных краткосрочных НИОКР с выходом на внедрение в самое ближайшее время (год-два).

Исходя из заранее определенного бюджета, следует работ разработать бизнес-проект (план с учетом окупаемости работ и с приложением технико-экономического обоснования

жизненного цикла) сначала на опытном «пилотном» городе (городке), а также мега-план по распространению положительного опыта в масштабе страны.

Безусловно, полезна короткая, но эффективная обкатка этого плана на брифингах наиболее авторитетных предприятий-специалистов, внесение поправок, утверждение, реализация.

Одна из очевидных проблем – управление транспортом. В этой области много усилий уделяется обсуждению и созданию беспилотных транспортных средств. Но рассуждения далеко опережают фактическую разработку, при этом вопрос о безопасности такого транспорта практически выносится за скобки. В частности, на совещании на эту тему в университете Салоники была озвучена вероятность безаварийного движения беспилотного транспортного средства на уровне 0,99999. Безусловно, эта цифра необоснованна. Кроме того, она не показательна без указания того, о каком сроке эксплуатации здесь идет речь. Например, если в городе имеется 100000 различных транспортных средств, это означает, то ежедневно в среднем одно такое средство должно попадать в аварию вследствие ошибки управляющей системы. Это слишком много. В масштабах страны и за один месяц это дает количества, с которыми никак нельзя примириться.

Вместе с тем, уже сейчас, на нынешнем этапе развития техники можно достаточно простыми средствами внедрить более простую и достаточно эффективную систему, а именно систему оперативной диагностики состояния водителя и аварийной парковки в случае потери управления. Например, водитель может заснуть вследствие переутомления, попасть в бессознательное состояние (обморок) и даже умереть – такое также случается (инфаркт, инсульт и т.п.). В таком случае чрезвычайно важно выявить такое состояние водителя и автоматически перевести транспортное средство в режим аварийной остановки с минимальным риском для пассажиров и для остальных участников движения.

Действительно, выявить признаки утери контроля водителем можно анализом видео изображений его лица, в том числе его глаз. Повысить достоверность такого анализа можно, например, путем формирования тревожного звукового сигнала водителю. Если водитель не отреагирует одним из предусмотренных способов (например, голосом или иным путем, предположим, троекратным сжиманием руля) на протяжении установленного времени (1–3 с), система безопасности жизни пассажиров может предпринять экстренное торможение (показатели которого зависят от скорости движения и рекомендаций, полученных теоретически и экспериментально);

одновременно следует, например, включить аварийные световые и звуковые сигналы для привлечения внимания остальных участников движения, это заставит их по возможности посторониться и позволить транспортному средству безаварийно остановиться. Стоимость такой системы в сотни раз меньше беспилотной системы управления, требования по надежности могут быть существенно снижены. Действительно, даже если такая система будет обладать в 1000 раз худшей надежностью, чем рассмотренный выше показатель, а именно, 0,99, то такая система позволит снизить статистику смертельных последствий в указанных аварийных случаях в 100 раз. Такими системами можно оснащать, прежде всего, автомобили водителей – дальнбойщиков, пожилых или больных водителей, степень риска которых при вождении выше среднего.

Другой важный аспект – устранение последствий аварий. В современных городах пробки зачастую происходят не столько от самих аварий (иногда и не слишком серьезных), сколько от того, что участники ДТП остаются на месте столкновения, создавая затрудненности движению, что также мешает подъехать на место ДТП автомобилям скорой помощи и транспортной полиции. Здесь требуется надежное решение, которое не обеспечивается наличием регистраторов на транспортных средствах, нужна система гарантированного доверия транспортной полиции средствам регистрации при условии полного покрытия этими средствами всех транспортных сетей по меньшей мере в пределах города, достоверность сведений о ДТП, что позволило бы сразу же после ДТП получить подтверждение того, что сохранение положения участников ДТП не требуется, можно немедленно приступать к освобождению проезжей части и ликвидации по возможности всех последствий аварии как можно скорей и эффективней. В отдельных случаях это позволило бы ускорить прибытие медиков и даже спасти жизни пострадавших.

## ВЫВОДЫ

Рассмотренные примеры позволяют утверждать, что технологии, объединяемые модными терминами «интернет вещей», «дополненная реальность», «умный город», «умный дом» включают в себя следующие инфокоммуникационные технологии, технологии робототехники и автоматики:

1. Технологии, которые могут повысить безопасность отдельных видов деятельности.
2. Технологии, способные улучшить качество жизни инвалидов.
3. Технологии, способные сберечь время.
4. Технологии, повышающие результативность действий человека (точность, скорость и т.п.).

5. Технологии, вносящие дополнительное разнообразие в досуг.

6. Технологии, улучшающие защиту здоровья.

7. Технологии, улучшающие взаимодействие людей друг с другом и с компьютером и техническими устройствами.

Также эти технологии можно разделить условно на следующие группы:

1. Уже внедренные технологии.

2. Технологии, готовые к внедрению.

3. Технологии, опробованные на уровне эффекта, для внедрения которых требуются ОКР.

4. Технологии на уровне идей, требующие апробации.

Также можно указать, что соединение нескольких технологий воедино открывает принципиально новые возможности (синергетический эффект).

Это требует высококвалифицированного анализа вследствие важности этой тематики по причине большого потенциала этих технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Approach to the garbage collection in the “Smart Clean City” project Andrei Borozdukhin; Olga Dolinina; Vitaly Pechenkin / 2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), 2016 / Marocco. P. 918 -922.
- [2] Borozdukhin A., Dolinina O., Pechenkin V. Method of Dynamic Rout Calculation in the “Smart City” Project. A. Borozdukhin, O. Dolinina, V. Pechenkin. Computer Technology and Application. Vol.7, Number 4, April 2016 (ser. Number 45), p.209-215.
- [3] URL: <http://city-smart.ru/>
- [4] URL: <http://gorodsreda.ru/umniy-gorod/>
- [5] URL: [http://itps.com/services/pr\\_sys/iiot/](http://itps.com/services/pr_sys/iiot/)
- [6] URL: <http://1234g.ru/novosti/iiot-v-rossii-i-mire>
- [7] URL: [https://www.youtube.com/watch?v=QjrHBO\\_xOk](https://www.youtube.com/watch?v=QjrHBO_xOk)
- [8] URL: <https://www.youtube.com/watch?v=xknr4n2J4-I>



**Александр Ляпидевский** - Кандидат экономических наук, директор Новосибирского института программных систем, автор около 100 научных статей. Область научных интересов и компетенций - программные системы и инструменты, инновационные технологии.



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

Россия, Новосибирск, 630090, просп. Ак. Лаврентьева 6/1. НИПС.

**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



**Ольга Николаевна Долинина** - директор института прикладных информационных технологий (ИнПИТ) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А., доктор технических наук, доцент.

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

410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77



**Любомир Ванков Димитров** – профессор, доктор технических наук, Технический университет Софии, проректор по международным связям, по учебной работе и по аккредитации.

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

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

Статья поступила 20.02.2018 г.

## The Concept of a Smart Home: Security, Additional Features and Augmented Reality

A.V. Lyapidevsky<sup>1</sup>, V.A. Zhmud<sup>1,2</sup>, O.N. Dolinina<sup>3</sup>, L.V. Dimitrov<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Novosibirsk Institute of Software Systems, Novosibirsk, Russia

<sup>2</sup>Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia,

<sup>3</sup>Saratov State University. Gagarina A.Yu., Saratov, Russia.

<sup>4</sup>Technical University Sofia, Sofia, Bulgaria

*Abstract:* The article discusses the technologies of the smart city, the Internet of things, virtual and augmented reality. It is shown that central planning of the development of these technologies is required. An analysis of individual areas and their

classification by importance is given; a classification is also proposed according to the readiness for implementation and the potential effect.

*Key words:* smart city technologies, internet of things, smart city technologies, internet of things, higher education, magistracy, mobility, automation, mechatronics, robotics, information technology.

## REFERENCES

- [1] Approach to the garbage collection in the “Smart Clean City” project Andrei Borozdukhin; Olga Dolinina; Vitaly Pechenkin / 2016 4th IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CiSt), 2016 / Marocco. P. 918 -922.
- [2] Borozdukhin A., Dolinina O., Pechenkin V. Method of Dynamic Rout Calculation in the “Smart City” Project. A. Borozdukhin, O. Dolinina, V. Pechenkin. Computer Technology and Application. Vol.7, Number 4, April 2016 (ser. Number 45), p.209-215.
- [3] URL: <http://city-smart.ru/>
- [4] URL: <http://gorodsreda.ru/umniy-gorod/>
- [5] URL: [http://itps.com/services/pr\\_sys/iiot/](http://itps.com/services/pr_sys/iiot/)
- [6] URL: <http://1234g.ru/novosti/iiot-v-rossii-i-mire>
- [7] URL: [https://www.youtube.com/watch?v=QjHBO\\_xOk](https://www.youtube.com/watch?v=QjHBO_xOk)
- [8] URL: <https://www.youtube.com/watch?v=xknr4n2J4-I>



**Alexander V. Liapidevskiy**, PhD in Economics, director of the Novosibirsk Institute of Program (Software) Systems, the author of about 100 scientific articles. Area of scientific interests and competences - software systems and tools, innovative technologies.

E-mail: [nips@nips.ru](mailto:nips@nips.ru)  
Russia, Novosibirsk, 630090, prosp. Ak. Lavrentieva 6/1. NIPS.



**Vadim 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



**Olga Dolinina** - Director of the Institute of Applied Information Technologies (InPIT), Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, Dr. of Techn. Sciences, Professor.  
E-mail: [olga@sstu.ru](mailto:olga@sstu.ru)

410054, Saratov,  
Polytechnicheskaya str., 77



Dr. of Techn. Sci. **Lubomir Dimitrov**.

Didactic title: Full Professor.  
Affiliation: Technical University of Sofia, Faculty of Mechanical Engineering, Bulgaria  
Scientific Fields: Mechatronics, Adaptive and optimal control, Intelligent diagnostic and control systems, MEMS.

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

The paper has been received on 20.02.2018.

# Требования к публикациям в научном электронном журнале «АиПИ»

## 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 [oa0\\_nips@bk.ru](mailto:oa0_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, обозначающей 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 Engineering*. 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>
Calculation and Optimization of Parameters of the Discrete PID-controller by the Ziegler-Nichols Method Vlavislav Yu. Vorobyov, Galina V. Sablina	9
Development of a Pneumoelectrical Control System of Machine of the Vacuum Dust Extraction Daniil A. Stepanov, Galina V. Sablina	15
<b>II. Robotics. Software and Systems. Telemechanics and Telemetry</b>	<b>21</b>
Choice and Connection Recommendations of Electromagnetic Relay for Switching Household Loadings A.I. Nezvanov, V.G. Trubin, M.V. Trubin	22
<b>III. Innovative Technologies. Promising Technologies. Simulation of Systems. Numerical optimization</b>	<b>33</b>
Advantages and Problems of Developing Unmanned One-Wheel Balancing Robots V.A. Zhmud, A.Yu. Ivoilov, L.D. Dimitrov, V.G. Trubin, J. Nosek, H. Roth	34
<b>IV. Measuring Means and Systems. Identification. Telemechanics and Telemetry</b>	<b>47</b>
Optimization of Multiplicative Image Wavelet Filtering Algorithms Yu.E. Voskoboynikov	48
Mobile Computer System for Diagnosing the State of the Organs of the Gastrointestinal Tract Based on Bluetooth Technology H.N. Zayniddinov, F.F. Rajabov, G. M. Hodjimatov	54
The Results of Deformographic Measurements in the Gallery at the Talay Observatory Yu.N. Fomin, V.M. Semibalamut, V.A. Zhmud, S.V. Panov, M.D. Parushkin, L.V. Dimitrov	65
Results of Observations of Long-Term Fluctuations of the Earth's Crust in the Baikal Rift Zone Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, S.V. Panov, M.D. Parushkin, L.V. Dimitrov	77
Application of the Empirical Mode Decomposition Method for Processing the Results of Deformographic Measurements Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, S.V. Panov, M.D. Parushkin, L.V. Dimitrov	87
Analysis of the signal of the earth crust strain gauge in the Baikal rift zone Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, D.O. Tereshkin, S.V. Panov, L.V. Dimitrov	101
<b>V. Information Technologies</b>	<b>109</b>
Distribution of Information and Noise Pulse Signals in the Optical Fiber During Protection of Information O.Kh. Kuldashov, , F.D. Mamarozikov, J.Muminov	110
<b>VI. Tools of Theory of Locked Dynamic Systems for Physical and Technical Sciences. Information for Authors</b>	<b>118</b>
The Concept of a Smart Home: Security, Additional Features and Augmented Reality A.V. Lyapidevsky, V.A. Zhmud, O.N. Dolinina, L.V. Dimitrov	119
Requirements for Publication in Scientific Electronic Journal "Automation and Software Engineering"	129
Content	135

**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: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_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 Department of Automation and Computer Systems 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 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** Dr. of Sci., Professor is with National Research University "Higher school of Economics" and Novosibirsk State Technical University, **Tomsk – Novosibirsk – Moscow, 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 Systems" 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 Electrical and Power Systems of NSRU, Doctor of Technical Sciences, Novosibirsk, **Russia**
- Olga Dolinina** Director of the Institute of Applied Information Technologies (InPIT), Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin, Dr. of Techn. Sciences, Professor, Saratov, **Russia**.
- Michail V. Kalinin** Content manager, NIPS, Novosibirsk, **Russia**

ISSN 2312-4997



ISSN 2312-4997 for paper version  
ISSN 2618-7558 for electronic pdf-version