

ISSN 2312-4997

# АВТОМАТИКА и ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

2015 N 1(11)

**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), **Россия**  
**Ответственный секретарь д.т.н., доцент Г.А. Французова**, НГТУ, **Россия**

**Редакционная коллегия:**

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

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

<b>Владимир Иванович Гололобов</b>	Руководитель лаборатории ПАО «НИПС», к.т.н., <b>Россия</b>
<b>Михаил Витальевич Калинин</b>	Руководитель отдела ПАО «НИПС», <b>Россия</b>
<b>Константин Витальевич Змеу</b>	Доцент, к.т.н., Заведующий кафедрой Технологий промышленного производства, Инженерной школы Федерального дальневосточного университета, Владивосток, <b>Россия</b>
<b>Thierry Chateau</b>	Head of Department, Professor, Institutute Pascal, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, <b>France</b> .
<b>Wolfram Hardt</b>	Prodekan für Internationales, Direktor Universitätsrechenzentrum, Professor für Technische Informatik, Technische Universität Chemnitz, <b>Germany</b>
<b>Виктор Петрович Мельчинов</b>	К.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, <b>Россия</b>
<b>Вячеслав Николаевич Федоров</b>	К.т.н., доцент кафедры радиотехники и информационных технологий Северо-восточного федерального университета им. М.К. Аммосова, Якутск, <b>Россия</b>
<b>Ульяна Анатольевна Михалёва</b>	К.т.н., заведующий кафедрой «Многоканальные телекоммуникационные системы» Технологического института ФГАОУ ВПО «Северо-Восточный Федеральный Университет им. М.К. Аммосова, Якутск, <b>Россия</b>
<b>Николай Дмитриевич Поляхов</b>	Д.т.н., профессор, СПбГЭТУ, член редакционной коллегии журнала «Электричество», член экспертного совета ВАК РФ. Санкт-Петербург, <b>Россия</b>
<b>Олег Владимирович Стукач</b>	Д.т.н., профессор, Заведующий кафедрой Компьютерных измерительных систем и метрологии Национального исследовательского Томского политехнического университета, Томск, РоссияНИ ТПУ, Томск, <b>Россия</b>
<b>Алексей Дмитриевич Припадчев</b>	Д.т.н., профессор, Заведующий кафедрой летательных аппаратов ФГБОУ ВПО «Ориенбургский государственный университет», Аэрокосмический институт, Оренбург, <b>Россия</b>
<b>Анастасия Дмитриевна Стоцкая</b>	К.т.н., доцент, Зам. зав. кафедрой Систем автоматического управления, Санкт-Петербургский Электротехнический университет (ЭТУ ЛЭТИ), Санкт-Петербург, <b>Россия</b>

УДК 681.2; 681.3; 681.5; 681.7

Автоматика и программная инженерия (Automatics & Software Enginery) № 1(11), 2015, ISSN 2312-4997. Основан в июне 2012 г.

**Учредитель журнала:**

Открытое акционерное общество «Новосибирский институт программных систем»  
Сайт организации: [www.nips.ru](http://www.nips.ru)

Свид. о регистрации ПИ № ФС77-55079

**Адрес редакции:**

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

e-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)  
web: <http://www.jurnal.nips.ru/>

Подписано в печать 23 апреля 2015 г.

## Оглавление

<b>I. Автоматика. Автоматизированные системы.....</b>	<b>7</b>
Исследование реального скользящего режима в модельной системе «перевернутый маятник» .....	9
Разработка алгоритма стабилизации модельной системы «вращающийся маятник» .....	16
Робастное проектирование ресурсосберегающего двухканального регулятора для объекта с одним выходом.....	22
Сравнительный анализ возможностей типовых регуляторов и регуляторов по методу локализации.....	29
<b>II. Робототехника. Программные средства и системы. Телемеханика и телеметрия. ....</b>	<b>35</b>
Метод блочной спорадической передачи данных с динамическим установлением апертур телеизмерений в системах телемеханики .....	37
Обмен данными между компьютером и микроконтроллером STM32F100 по последовательному интерфейсу связи RS-232 .....	45
Модернизация модели робота-пылесоса .....	52
<b>III. Инновационные технологии. Перспективные технологии. Моделирование систем. Численная оптимизация.....</b>	<b>55</b>
Регулятор с разделением «правильных» и «неправильных» движений .....	57
Нейро-нечеткое моделирование изменений уровней грунтовых вод Кегейлийского водозабора .....	63
<b>IV. Измерительные средства и системы. Идентификация.....</b>	<b>68</b>
Проектирование сенсорных кнопок на базе микросхемы ГТР-224.....	70
Использование измерительной системы MPU 6050 для определения угловых скоростей и линейных ускорений.....	75
Двухэтапный квазиоптимальный алгоритм вейвлет-фильтрации сигналов и изображений .....	81
Идентификация нелинейной системы прямого нагрева воздуха.....	90
Использование модулярной арифметики при фазовых измерениях .....	97
<b>V. Популярные статьи. Введение в специальность. ....</b>	<b>108</b>
О характерных правилах подготовки отчетов, обзоров и статей и диссертаций по техническим наукам .....	110
<b>VI. Дискуссии. Форум. К сведению авторов.....</b>	<b>127</b>
Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия» .....	129
Content .....	132

**I. Автоматика.  
Автоматизированные системы.**

## Содержание раздела:

- Сажин А. И., Саблина Г.В. Исследование реального скользящего режима в модельной системе «перевернутый маятник». ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 9–15.
- Стажилов И. В. Разработка алгоритма стабилизации модельной системы «вращающийся маятник». ФГБОУ ВО НГТУ и ФГБУН Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 16–21.
- Жмудь В. А., Семибаламут В. М., Димитров Л. В. Робастное проектирование ресурсосберегающего двухканального регулятора для объекта с одним выходом. ФГБОУ ВО НГТУ, ФГБУН Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск, Россия), Технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 22–28.
- Г.А. Французова, Е.П. Толстоконева, Н.Ю. Шилкова. Сравнительный анализ возможностей типовых регуляторов и метода локализации. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 29–34.

# Исследование реального скользящего режима в модельной системе «перевернутый маятник»

Сажин А. И., Саблина Г.В.  
ФГБОУ ВО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация.** Рассматривается возможность решения задачи стабилизации неустойчивой электромеханической системы «перевернутый маятник». Приводятся дифференциальные уравнения, описывающие поведение данной системы, и осуществляется переход к ее линеаризованной модели. Для линейной модели разрабатывается процедура организации скользящего режима, которая позволяет обеспечить на выходе автоколебания заданной амплитуды и частоты. Проводится моделирование замкнутой системы с различными видами исполнительного механизма: идеальное реле, реле с зоной нечувствительности и реле с гистерезисом.

**Ключевые слова:** перевернутый маятник, неустойчивая система, скользящий режим, автоколебания.

## ВВЕДЕНИЕ

Данная статья посвящена решению задачи стабилизации перевернутого маятника, которая является интересной как в теоретическом, так и в прикладном отношении, о чем свидетельствуют многочисленные отечественные и иностранные публикации [1–5]. Неослабевающий интерес к данной проблеме лишь подтверждает тот факт, что еще не решены все вопросы, которые, как правило, возникают в ее рамках. Предложенные ранее способы стабилизации перевернутого маятника в основном ориентированы на получение и использование линейных математических моделей данного объекта, что не всегда позволяло получить желаемые свойства в замкнутой системе. Например, не удалось обеспечить качественную работу в условиях действия различного рода возмущений.

Наличие у большинства объектов с моделью «перевернутого маятника» релейного исполнительного зачастую определяет выбор разрывного алгоритма стабилизации на основе метода скользящих режимов [6].

Так как идеальных реле не существует, и все исполнительные механизмы обладают либо гистерезисом, либо зоной нечувствительности, особый интерес представляет расчет реального скользящего режима и исследование влияния не

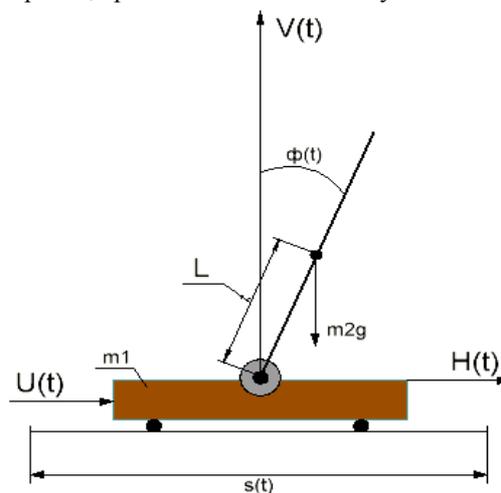
идеальностей на параметры автоколебательных движений в системе.

## 1. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Система управления «перевернутый маятник» представляет собой однородный стержень (маятник), шарнирно закрепленный на подвижной каретке, способной перемещаться в плоскости оси закрепления под действием силы, прикладываемой управляющим двигателем.

Схематическое представление системы показано на *Рис. 1*. Здесь  $\varphi(t)$  – угол отклонения маятника от вертикали (выходная переменная),  $U(t)$  – прикладываемая сила (входная переменная),  $s(t)$  – перемещение каретки,  $m_1$  – масса каретки,  $F$  – коэффициент трения каретки,  $J$  – момент инерции маятника относительно центра тяжести,  $L$  – расстояние между осью и центром тяжести маятника,  $m_2$  – масса маятника,  $g$  – ускорение силы тяжести,  $H(t)$  и  $U(t)$  – горизонтальная и вертикальная силы реакции у оси маятника.

Трение учитывается только при движении каретки, трение оси маятника не учитывается.



*Рис.1.* Система управления «перевернутый маятник»

Из литературы известно, что поведение данной системы может быть описано следующими нелинейными дифференциальными уравнениями [7]

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}(t) - \frac{g}{L'} \sin \varphi(t) + \frac{1}{L'} \ddot{s}(t) \cos \varphi(t) = 0, \\ m_1 \ddot{s}(t) = U(t) - F \dot{s}(t), \end{cases} \quad (1)$$

где  $L'$  – эффективная длина маятника, вычисляемая по формуле

$$L' = \frac{J + m_2 L^2}{m_2 L}, \quad (2)$$

$J$  – момент инерции маятника относительно центра тяжести

$$J = \frac{m_2 L^2}{3}. \quad (3)$$

Далее будем рассматривать математическую модель объекта «каретка-маятник», учитывая следующие дополнительные ограничения на ресурс прикладываемого к объекту управления

$$U \in [-U_{\min}, U_{\max}]. \quad (4)$$

и на диапазон перемещения каретки

$$s \in [-s_{\min}, s_{\max}]. \quad (5)$$

Для упрощения дальнейшего описания введем следующие обозначения:

$$\frac{F}{m_1} = a_2, \quad g = a_4, \quad \frac{1}{m_1} = b_2, \quad \frac{1}{L'} = c_1. \quad (6)$$

Тогда (1) переписывается следующим образом:

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}(t) - a_4 c_1 \sin \varphi(t) + c_1 \ddot{s}(t) \cos \varphi(t) = 0, \\ \ddot{s}(t) = -a_2 \dot{s}(t) + b_2 U(t). \end{cases} \quad (7)$$

Структурная схема системы «перевернутый маятник», соответствующая уравнениям (7), представлена на Рис. 2. Очевидно, данную подсистему можно разделить на две подсистемы: подсистема «каретка» и подсистема «маятник».

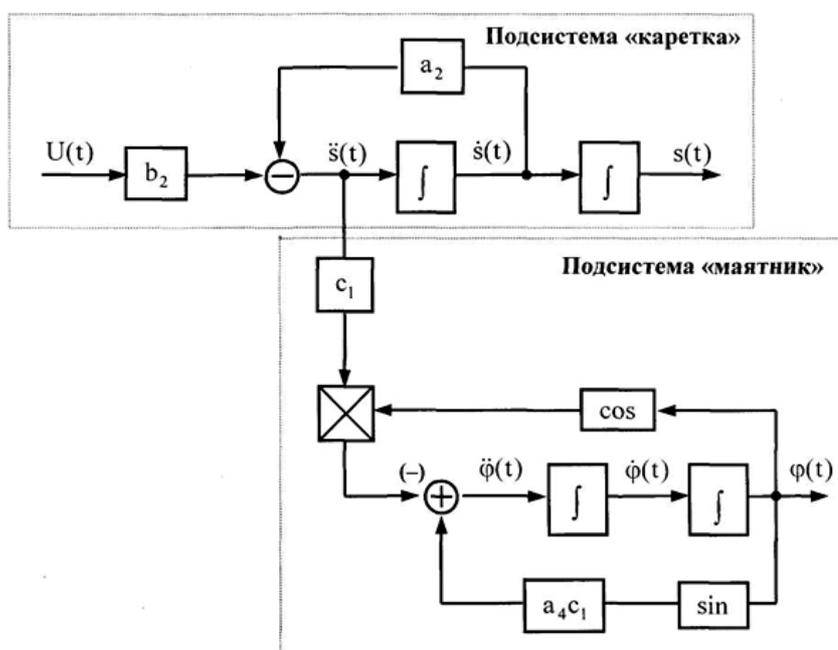


Рис. 2. Структурная схема системы управления «перевернутый маятник»

Задачей синтеза является приведение угла отклонения маятника от вертикали к нулевому значению с одновременной стабилизацией координаты каретки в ограниченном диапазоне в соответствии с условиями:

$$\begin{aligned} \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) &= 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} s(t) &\in [-s_{\min}, s_{\max}], \end{aligned} \quad (8)$$

при выполнении требования по быстродействию к переходному процессу в системе

$$t_n \leq t_n^*. \quad (9)$$

## 2. ЛИНЕАРИЗАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Для начала проверим условия разрешимости поставленных задач синтеза, перейдя к рассмотрению линейной модели объекта, как это зачастую делается в литературе [7].

В данном случае, если допустить, что углы отклонения маятника от вертикали находятся в диапазоне  $\pm 5^\circ$ , и разложить  $\sin$  и  $\cos$  в ряды Тейлора [8]

$$\sin \varphi = \varphi - \frac{\varphi^3}{6} + \dots \approx \varphi, \quad (10)$$

$$\cos \varphi = 1 - \frac{\varphi^2}{2} + \dots \approx 1, \quad (11)$$

то, подставляя в (7) только первые члены, получим совокупность линейных дифференциальных уравнений, которые описывают поведение системы «перевернутый маятник» в рабочей точке

$$\begin{cases} \ddot{\varphi}(t) - a_4 c_1 \varphi(t) + c_1 \ddot{s}(t) = 0, \\ \ddot{s}(t) = -a_2 \dot{s}(t) + b_2 U(t). \end{cases} \quad (12)$$

Посмотрим, разрешима ли задача синтеза для данного объекта в постановке (1.8). Рассмотрим множество состояний равновесия, для чего перейдем к описанию объекта в переменных состояния. Выберем в качестве переменных состояния следующие

$$\begin{cases} x_1(t) = s(t), \\ x_2(t) = \dot{s}(t), \\ x_3(t) = s(t) + c_1^{-1} \varphi(t), \\ x_4(t) = \dot{s}(t) + c_1^{-1} \dot{\varphi}(t) \end{cases} \quad (13)$$

в силу того, что с одной стороны это описание уже известно из литературы [7], с другой – это просто удобно. Здесь третья координата, представляет собой линейную аппроксимацию перемещения точки маятника, находящейся на расстоянии эффективной длины от оси. В дальнейшем будем называть ее перемещением маятника.

Уравнения состояния будут иметь вид

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_2 + b_2 U, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = a_4 c_1 (x_3 - x_1), \\ y = \varphi = c_1 (x_3 - x_1). \end{cases} \quad (14)$$

Прежде чем выбирать подходящий метод синтеза, необходимо убедиться, что задача синтеза в постановке (1.8) для модели (2.5) является разрешимой. Соответствующий анализ был проведен в [9], где было показано, что множество равновесных состояний системы таково, что поставленная задача синтеза может быть решена. Система «перевернутый маятник» является неустойчивой, полностью управляемой, и не полностью наблюдаемой. По измеряемому выходу можно восстановить все координаты состояния, кроме координаты каретки  $x_1(t)=s(t)$ .

Также показано, что относительной старшей производной системы [10] является вторая, и ее порядок не равен порядку объекта. Из чего следует, что система «перевернутый маятник» обладает подсистемой вырожденных движений [11]. Показано, что данной подсистемой является подсистема «каретки» и она находится на границе устойчивости [10]. Это ограничивает применение для синтеза данного объекта практически любого из известных методов, особенно в случае, когда стоит задача не только обеспечить требование по стабилизации угла маятника, но и требование по

стабилизации координаты каретки в ограниченном диапазоне. Поскольку координата каретки принадлежит подсистеме вырожденных движений, любое незначительное изменение параметров объекта может привести к тому, что процессы по этой координате выйдут за пределы устойчивости. Это в свою очередь может привести к тому, что вся система потеряет работоспособность.

### 3. ОРГАНИЗАЦИЯ СКОЛЬЗЯЩЕГО РЕЖИМА ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ СИСТЕМЫ «ПЕРЕВЕРНУТЫЙ МАЯТНИК»

Для того чтобы правильно решить поставленную задачу синтеза, предлагается поступить следующим образом. В работе [9] показано, что по измеряемой выходной переменной  $\varphi(t) = y(t)$  можно восстановить все переменные состояния, кроме координаты каретки  $s(t) = x_1(t)$ . Если технически с помощью специального датчика есть возможность отдельно измерять эту координату, то весь вектор состояния будет доступен измерению. Это позволит с помощью введения отрицательных обратных связей предварительно скорректировать вырожденную подсистему «каретка», сделав ее устойчивой. Затем можно переходить к формированию управления на модифицированный объект, используя при этом один из методов синтеза нелинейных систем.

Большинство реальных объектов с математической моделью «перевернутого маятника» имеют релейный исполнительный механизм. То есть, управление, которое прикладывается к объекту, может принимать только одно из двух возможных значений:  $+U_{\max}$  или  $-U_{\max}$ . Это обстоятельство определило выбор метода синтеза, на основе которого была разработан алгоритм стабилизации данного объекта. Предлагается организовать в системе скользящий режим и сформировать управление вида:

$$U = \bar{U} \operatorname{sign} S(x), \quad (15)$$

где  $\bar{U}$  - максимальный уровень размаха реле, который допускается технически,  $S(x)$  - поверхность скольжения, причем:

$$U = \begin{cases} +U, & S(x) > 0, \\ -U, & S(x) < 0. \end{cases} \quad (16)$$

Обычная процедура организации скользящего режима предполагает формирование уравнения поверхности скольжения в виде линейного дифференциального уравнения порядка  $(l - 1)$ , где  $l$  – порядок относительной старшей производной объекта. И для того, чтобы обеспечить желаемые процессы по выходной переменной (углу отклонения маятника от вертикали), в нашем случае достаточно было бы задать уравнение поверхности первого порядка.

Необходимость стабилизировать внутреннюю вырожденную подсистему привела к разработке модифицированной процедуры организации скользящего режима [9].

Предлагается выбрать уравнение поверхности, ориентируясь не на порядок относительной старшей производной, а на полный порядок объекта. В данном случае это уравнение поверхности третьего порядка, которое позволит использовать в законе управления, в том числе и обратные связи по координатам состояния вырожденной подсистемы «каретка».

Сформируем его в виде

$$S(x) = F_1 + F_2, \quad (17)$$

где

$$F_1 = -\gamma_1 x_1 - \gamma_2 x_2 \quad (18)$$

выбирается с целью стабилизации вырожденной подсистемы, а

$$F_2 = -\gamma_3 x_3 - \gamma_4 x_4 \quad (19)$$

выбирается с целью стабилизации угла маятника.

Коэффициенты:  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$  и  $\gamma_4$  определяют движение системы по поверхности скольжения, их подробный расчет приведен в [9].

Далее в соответствии с известной процедурой расчета скользящего режима с помощью эквивалентного управления [6] доопределяются уравнения в режиме скольжения, находится уровень полки реле  $\bar{U}$ , при котором возникает устойчивый скользящий режим.

Для оценки недоступных измерению переменных состояния предлагается использовать два фильтра оценки состояния второго порядка с одинаковыми передаточными функциями:

$$W_{\Phi 1}(p) = W_{\Phi 2}(p) = \frac{1}{T_{\Phi}^2 p^2 + 2dT_{\Phi}p + 1}, \quad (20)$$

поскольку, как уже было сказано, при формировании поверхности скольжения потребуется весь вектор состояния.

В выражении (20)  $T_{\Phi}$  - постоянная времени фильтра,  $d$  - коэффициент демпфирования.

Постоянная времени фильтра выбирается на основе известного [10] соотношения

$$T_{\Phi} \leq 0.1 \frac{t_{п}^*}{3}, \quad (21)$$

где  $t_{п}^*$  - желаемое время переходного процесса в системе. Коэффициент демпфирования выбирается из расчета

$$d = 0.5 + 1, \quad (22)$$

для обеспечения желаемой степени колебательности процессов.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ СО СКОЛЬЖАЩИМ РЕЖИМОМ

Структурная схема замкнутой системы с регулятором в скользящем режиме при использовании операции «расщепления» фильтра оценки состояния [10] представлена на Рис. 3. Организованный таким образом закон управления позволил структурно выделить в замкнутой системе контур быстрых движений (на Рис. 3. обозначен пунктирной линией), в котором при выходе на скользящий режим будет происходить локализация проявления нелинейностей (которые имеются в реальном объекте) и внешних возмущений, действующих на объект.

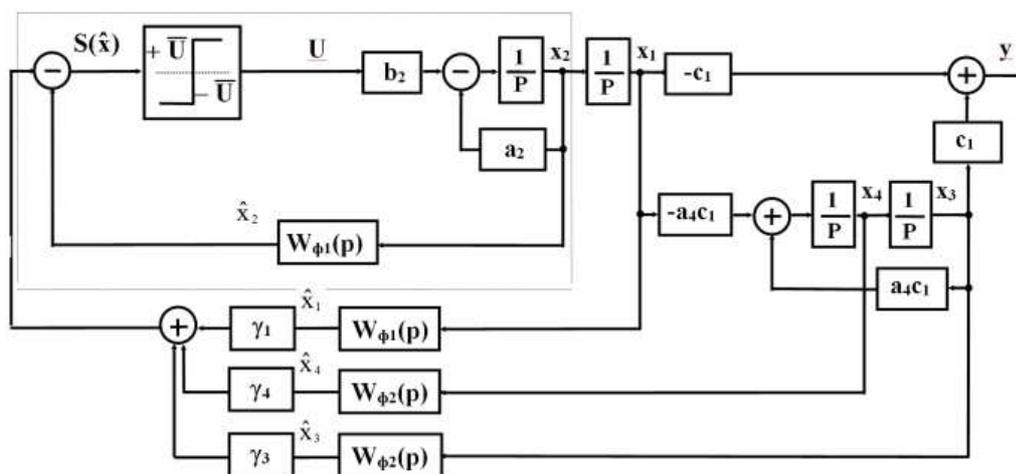


Рис. 3. Структурная схема системы с регулятором в скользящем режиме с «расщепленным фильтром»

Характерным состоянием равновесия данного контура, как известно, являются автоколебания, наличие которых приводит к появлению автоколебательных процессов на выходе системы. В работе [9] получены зависимости амплитуды и частоты выходной координаты – угла отклонения

маятника от вертикали от постоянной времени фильтра внутреннего автоколебательного контура, когда в качестве исполнительного механизма использовалось идеальное реле. Это позволило выделить диапазон работоспособности системы по амплитуде и частоте колебаний

маятника и работать внутри этого диапазона.

Разработанная система стабилизации «перевернутого маятника была смоделирована в среде Matlab Simulink для численных значениях параметров исследуемого объекта, приведенных в Таблице 1.

Таблица 1

Параметр	Значение	Ед. изм.
$a_2$	10	$c^{-1}$
$\pm c_1$	$\pm 1.5$	м
$\pm a_4 c_1$	$\pm 14.7$	$c^{-2}$
$V_2$	10	$кг^{-1}$
$d$	0.55	
$T_\phi$	0.045	с
$1/T_\phi$	$4.94 \times 10^2$	$c^{-2}$
$2d/T_\phi$	24.44	$c^{-1}$
$U$	0.5	Н
$\gamma_1$	-12	$кг \times c^{-2}$
$\gamma_3$	16.08	$кг \times c^{-2}$
$\gamma_4$	4.2	$кг \times c^{-1}$

В этой же таблице приведены рассчитанные значения параметров фильтров оценки состояния, коэффициентов поверхности скольжения и уровня полки реле. На Рис. 4. представлена схема моделирования замкнутой системы со скользящим режимом. На Рис. 5 представлены результаты моделирования системы со скользящим режимом с идеальным реле.

На следующем этапе было проведено моделирование замкнутой системы для случая реле с зоной нечувствительности. Переходные процессы представлены на Рис. 6.

Далее было проведено моделирование замкнутой системы для случая реле с гистерезисом. Переходные процессы представлены на Рис. 7.

Анализ полученных переходных процессов позволяет сделать вывод о том, что наличие у релейного исполнительного механизма зоны нечувствительности в системе «перевернутый маятник» не влияет на значения параметров автоколебаний (амплитуды и частоты) выходной координаты – угла отклонения маятника от вертикали, а также координаты каретки.

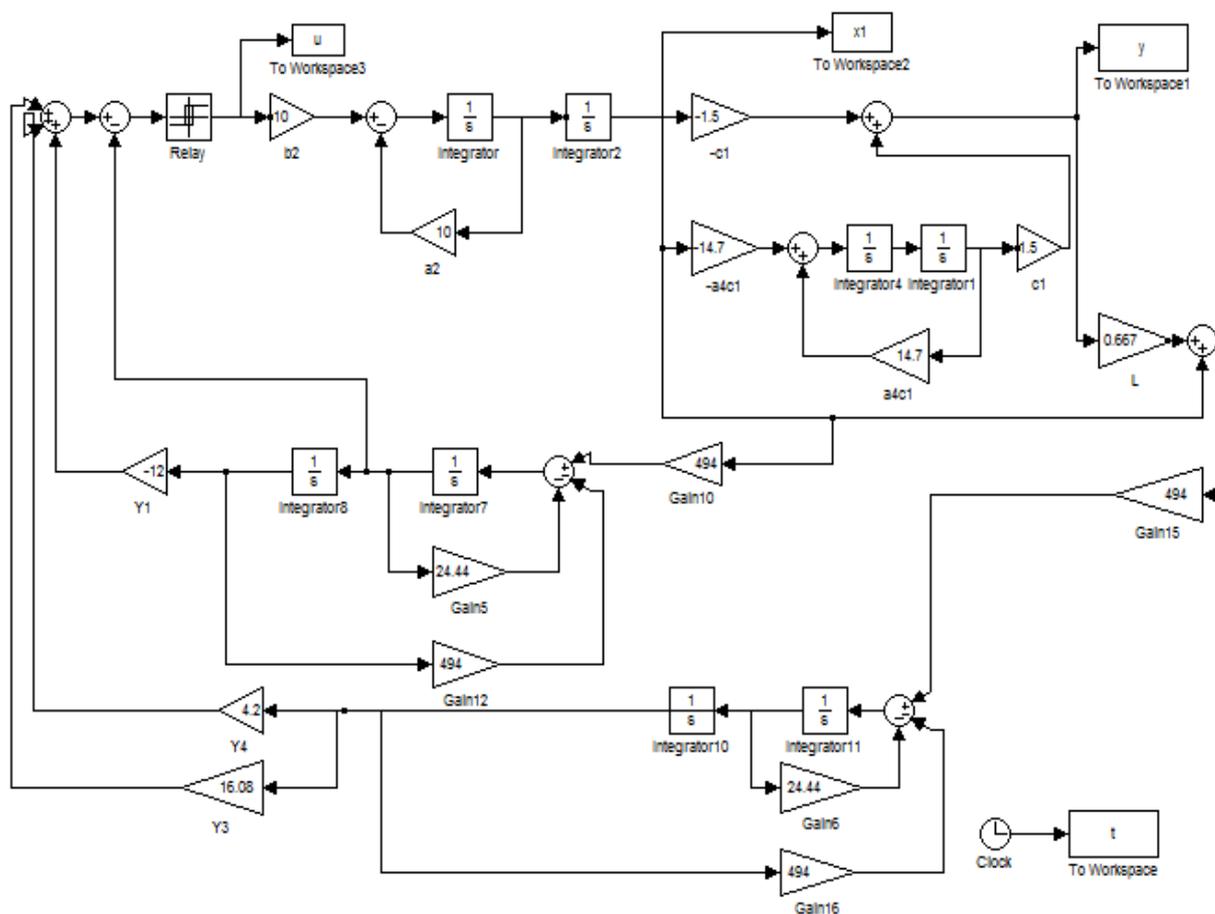


Рис. 4. Схема моделирования замкнутой системы

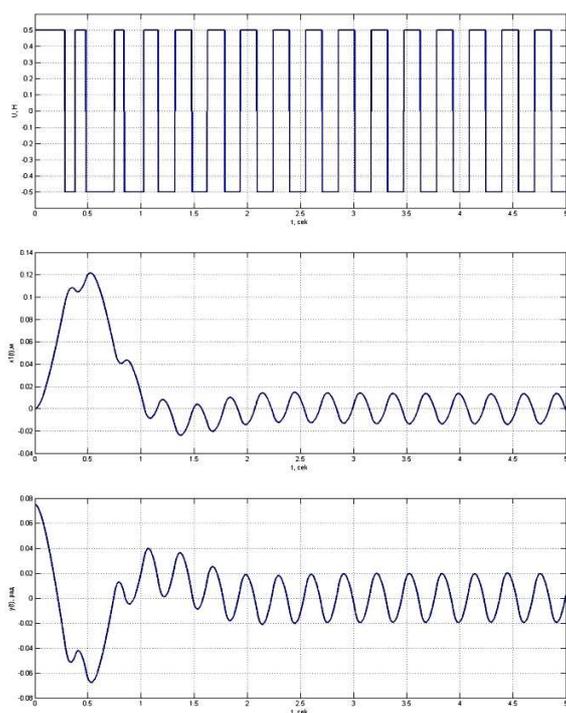


Рис. 5. Переходные процессы по управляющему воздействию, координате каретки и углу маятника (идеальное реле)

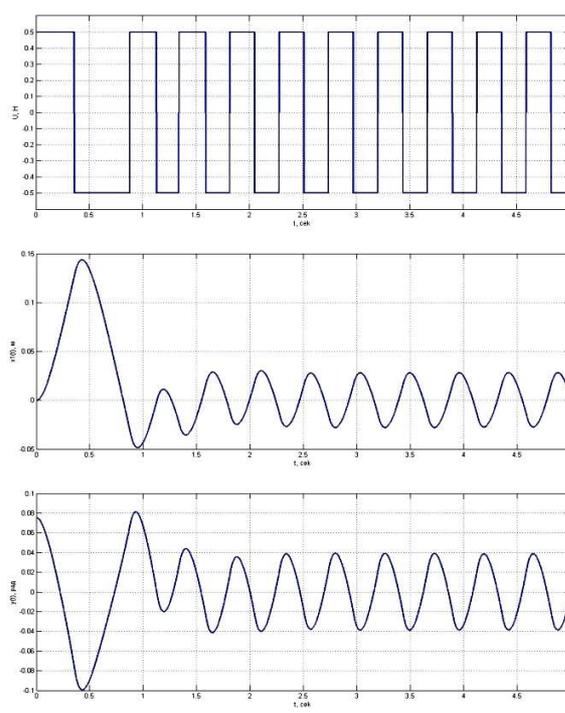


Рис. 7. Переходные процессы по управляющему воздействию, координате каретки и углу маятника (реле с гистерезисом)

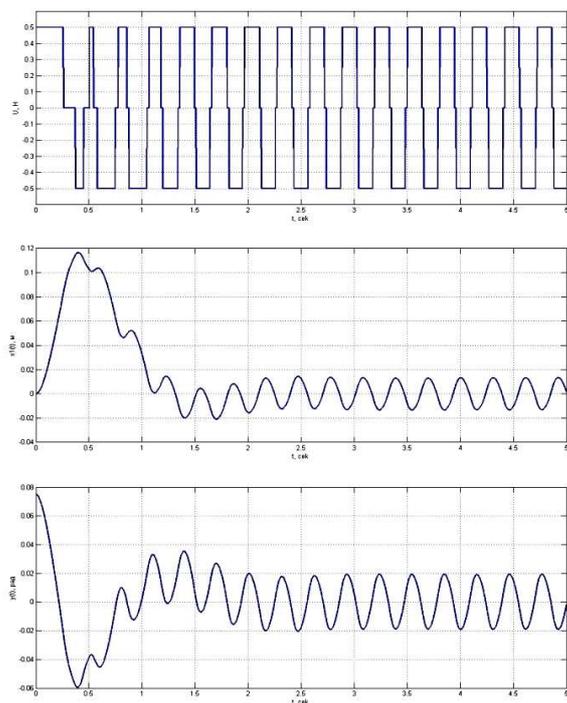


Рис. 6. Переходные процессы по управляющему воздействию, координате каретки и углу маятника (реле с зоной нечувствительности)

Включение в систему релейного исполнительного механизма с гистерезисом приводит к увеличению значения амплитуды и уменьшению значения частоты автоколебаний, как по углу отклонения маятника, так и по координате каретки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье обсуждались вопросы организации скользящего режима в модельной системе «перевернутый маятник». Проводилось моделирование замкнутой системы со скользящим режимом для случая идеального реле, а также для случаев наличия в релейном исполнительном механизме не идеальностей в виде зоны нечувствительности и гистерезиса. Проведенные эксперименты показали, что на параметры автоколебаний в исследуемой системе наличие зоны нечувствительности не влияет, тогда, как наличие гистерезиса приводит к увеличению амплитуды и уменьшению частоты автоколебаний маятника.

В дальнейшей работе планируется получить аналитические соотношения для расчета амплитуды и частоты автоколебаний маятника при использовании в качестве исполнительного механизма реле с гистерезисом и реле с зоной нечувствительности и тем самым подтвердить полученные экспериментальные результаты. Также планируется проектирование регулятора методом численной оптимизации, например, так, как описано в [12–14].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Формальский А.М. Управление движением неустойчивых объектов-М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.-232 с.
- [2] Дружинина О.В. и др. Моделирование и построение алгоритма стабилизации перевернутого маятника. Динамика сложных систем -XXI век. 2012 г., №4, стр. 74-78.
- [3] Саблина Г.В., Дроздова О.Н. Исследование и синтез системы «двойной перевернутый маятник на тележке»//

Матер. VIII международной н. т. конференции Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП). Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2006, Т7, с.249-252.

- [4] Eugene I. Butikov. On the dynamic stabilization of an inverted pendulum. St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia. Received 21 June 2000; accepted 19 January 2001. [http://butikov.faculty.ifmo.ru/Oscillations/Inverted\\_Pendulum.pdf](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Oscillations/Inverted_Pendulum.pdf)
- [5] Андриевский Б.Р., Гузенко П.Ю., Фрадков А.Л. Управление нелинейными колебаниями механических систем методом скоростного градиента. // Автоматика и Телемеханика. - М.: Наука, 1996.
- [6] Уткин В.И. Скользящие режимы в задачах оптимизации и управления. - М.: Наука, 1981.
- [7] Квакернаак Х., Сиван Р. Линейные оптимальные системы управления. - М.: Мир, 1977.
- [8] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-13-е изд., исправленное. - М.: Наука, 1986.
- [9] Саблина Г.В. Разработка и исследование методики стабилизации объекта управления «каретка-маятник»: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск, 2000 г.
- [10] Востриков А.С., Французова Г.А., Гаврилов Е.Б. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие - Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2008, 476 с.
- [11] Смагина Е.М. Вопросы анализа линейных многомерных объектов с использованием понятия нуля системы. – Томск: Издательство Томского университета, 1990.
- [12] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [13] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [14] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>



**Сажин Андрей Игоревич**, магистрант кафедры автоматки Новосибирского государственного технического университета  
Email: [andrewsajin@gmail.ru](mailto:andrewsajin@gmail.ru)



**Саблина Галина Владимировна**, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматки Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов - стабилизация электромеханических колебательных систем с неустойчивыми вырожденными движениями. Автор и соавтор более 40 научных и учебно-методических работ.  
Email: [sablina@corp.nstu.ru](mailto:sablina@corp.nstu.ru)

## Research of the Real Sliding Mode in "Inverted Pendulum" Model System

Andrew Sazhin, Galina Sablina

**Abstract.** The possibility of a stabilization task

solution of unstable electromechanical system "inverted pendulum" is considered. The differential equations describing behavior of this system are given and transition to its linearized model is performed. Procedure of the organization of the sliding mode which allows providing at the exit of self-oscillation of the set amplitude and frequency is developed for linear model. Modeling of the closed system with different types of the executive mechanism is carried out: the ideal relay, the relay with a zone of tolerance and the relay with a hysteresis.

**Keywords:** inverted pendulum, unstable system, sliding mode, self-oscillations.

## REFERENCES

- [1] Formal'skii A.M. Motion control of unstable objects M.: FIZMATLIT, 2012.-232 p.
- [2] O. Druzhinina et al. Modeling and Building of Algorithm for the Stabilization of the Inverted Pendulum. The dynamics of complex systems -XXI century. 2012, №4, pp. 74-78.
- [3] Sablina G.V., Drozdov O.N. Research and synthesis of system "double inverted pendulum on a cart". Collection of papers of VIII International Sci.-Techn. Conference Actual problems of electronic instrument (APIE)". Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2006 V.7 p.249-252.
- [4] Eugene I. Butikov. On the dynamic stabilization of an inverted pendulum. St. Petersburg State University, St. Petersburg, Russia. Received 21 June 2000; accepted 19 January 2001. [http://butikov.faculty.ifmo.ru/Oscillations/Inverted\\_Pendulum.pdf](http://butikov.faculty.ifmo.ru/Oscillations/Inverted_Pendulum.pdf)
- [5] Andrievskii B.R., Gouzenko P.Yu., Fradkov AL Control of nonlinear oscillations of mechanical systems by method of speed gradient. Automation and Remote Control. - Moscow: Nauka, 1996.
- [6] Utkin V.I. Sliding modes in problems of optimization and control. - Moscow: Nauka, 1981.
- [7] Kvakernaak X., Sivan R. Linear optimal control systems. - Moscow: Mir, 1977.
- [8] Bronstein, I.N., Semendyaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and students of higher technical educational institutis, 13th ed., Revised. - M.: Nauka, 1986.
- [9] Sablina G.V. Development and research of methods of stabilization of control "carriage-pendulum": Authoreferate of dissertation for science degree of Cand. Technical Sciences (PhD). - Novosibirsk, 2000
- [10] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A., Gavrilov E.B. Theory of automatic control: Proc. Guide - Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2008, 476 p.
- [11] Smagina E.M. Questions of analysis of linear multidimensional objects using the concept of zero of the system. - Tomsk: Tomsk University Publishing House, 1990.
- [12] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [13] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [14] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>

# Разработка алгоритма стабилизации модельной системы «вращающийся маятник»

Стажиков И.В.

ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В данной статье обсуждается возможность решения задачи стабилизации неустойчивой электромеханической системы «вращающийся маятник». Показывается схематическое представление исследуемой системы, приводятся нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие её поведение. Осуществляется переход к упрощенной модели, для которой проводится исследование основных качественных свойств. Разрабатывается алгоритм стабилизации, позволяющий обеспечить на выходе процессы требуемого качества. Проводится моделирование замкнутой системы в программной среде *Matlab Simulink*.

**Ключевые слова:** вращающийся маятник, модель, исследование, стабилизация.

## ВВЕДЕНИЕ

На практике зачастую возникают проблемы при управлении движением различных электромеханических систем. Для формирования желаемого режима в большинстве случаев рекомендуется строить закон управления, чаще всего с обратной связью. В случае с классом нелинейных объектов синтез автоматических систем представляется достаточно сложной задачей. Наибольшую трудность вызывает построение алгоритма управления для систем с неустойчивыми или находящимися на границе устойчивости вырожденными движениями, процессы в которых развиваются произвольным образом и, в конечном итоге, могут привести к потере работоспособности всей системы в целом. В таких случаях применяется подход, заключающийся в предварительной коррекции подсистемы вырожденных движений при помощи введения в ней отрицательных обратных связей [1-3]. После чего, можно формировать алгоритм управления для обеспечения желаемых свойств по выходной переменной объекта.

Данная статья посвящена решению проблемы стабилизации модельной системы «вращающийся маятник», которую можно рассматривать как успешную лабораторную идеализацию груза, подвешенного на канате подъемного крана.

Обсуждаемый объект управления представляет собой груз (1), подвешенный на нерастяжимой нити (2). Нить прикреплена к вращающейся руке (3), которая в свою очередь жестко соединена со стержнем (4), способным

вращаться в диапазоне  $360^\circ$  в обе стороны под действием управляющего воздействия.

Схематическое представление системы «вращающийся маятник» представлено на *рис. 1*.

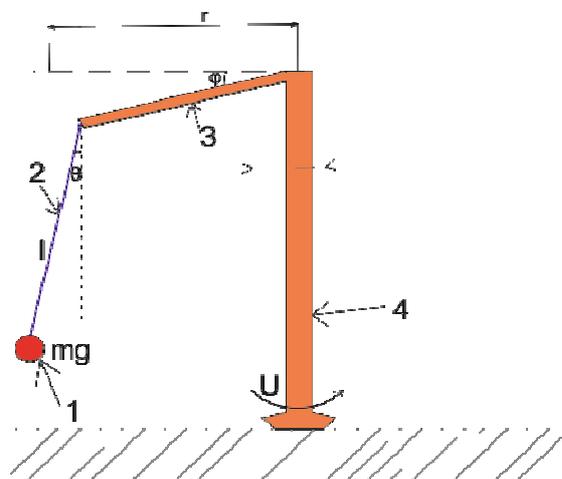


Рис.1. Система «вращающийся маятник»

## 1. ОПИСАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ «ВРАЩАЮЩИЙСЯ МАЯТНИК» И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Динамика объекта может быть описана с помощью следующих уравнений:

$$\begin{cases} (J_p + Ml^2)(\ddot{\theta} - \dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta) + Mrl\dot{\varphi} \cos \theta + \\ + R\dot{\theta} + gl(M + \frac{m}{2}) \sin \theta = 0, \\ Mrl\ddot{\theta} \cos \theta - Mrl\dot{\theta}^2 \sin \theta + 2(J_p + ml^2)\dot{\theta}\dot{\varphi} \sin \theta \cos \theta + \\ + (J + mr^2 + Mr^2 + (J_p + ml^2) \sin^2 \theta)\ddot{\varphi} = U. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь  $\theta$  - угол отклонения груза (выходная переменная),  $\varphi$  - угол поворота вращающейся руки (выходная переменная),  $U$  - прикладываемый момент (входная переменная),  $l$  - длина нити,  $M$  - масса груза,  $J_p$  - момент инерции груза,  $r$  - радиус (длина) вращающейся руки,  $m$  - масса вращающейся руки,  $J$  - момент инерции вращающейся руки,  $g$  - ускорение силы тяжести,  $R$  - коэффициент затухания колебаний

груза.

Сделаем в (1) замену переменных:

$$\begin{cases} a = J_p + Ml^2, \\ b = J + Mr^2 + mr^2, \\ c = Mrl, \\ d = lg + (M + \frac{m}{2}), \end{cases} \quad (2)$$

и допустив с целью упрощения, что

$$\dot{\varphi}^2 = 0, \quad \dot{\theta}^2 = 0, \quad \dot{\theta} \cdot \dot{\varphi} = 0,$$

получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} a\ddot{\theta} + c\ddot{\varphi} \cos \theta + R\dot{\theta} + d \sin \theta = 0, \\ c\ddot{\theta} \cos \theta + (b + a \sin^2 \theta)\ddot{\varphi} = U. \end{cases} \quad (3)$$

Для системы «вращающийся маятник» накладываются следующие дополнительные ограничения на ресурс прикладываемого к системе управления:

$$U \in [-U_{\max}, U_{\max}], \quad (4)$$

и ограничения на диапазон углов поворота вращающейся руки:

$$\varphi \in [-\varphi_{\max}, \varphi_{\max}]. \quad (5)$$

Задача синтеза, которую необходимо решить для данного объекта это приведение угла отклонения груза от вертикали к нулевому значению с одновременной стабилизацией координаты вращающейся руки в ограниченном диапазоне углов в соответствии с условиями:

$$\begin{cases} \lim_{t \rightarrow \infty} \theta(t) = 0, \\ \lim_{t \rightarrow \infty} \varphi(t) \in [-\varphi_{\max}, \varphi_{\max}], \end{cases} \quad (6)$$

при выполнении требований по быстродействию к переходному процессу в системе ( $t_n \leq t_n^*$ ), где  $t_n^*$  - желаемое время переходного процесса.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ ПО ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ МОДЕЛИ

Перед выбором алгоритма стабилизации системы «вращающийся маятник» необходимо убедиться, что задача синтеза в постановке (6) для модели (3) будет иметь решение.

На первом этапе исследуем свойства объекта управления по его линейной модели. Если допустить, что мы имеем дело с углами отклонения груза от вертикали в диапазоне  $\pm 5^\circ$ , и разложить  $\sin$  и  $\cos$  в ряды Тейлора[4], мы получим следующую систему линейных дифференциальных уравнений, описывающих поведение объекта «вращающийся маятник» в рабочей точке:

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{bd}{c^2 - ab} \theta + \frac{bR}{c^2 - ab} \dot{\theta} + \frac{c}{c^2 - ab} U, \\ \ddot{\varphi} = -\frac{dc}{c^2 - ab} \theta - \frac{cR}{c^2 - ab} \dot{\theta} - \frac{a}{c^2 - ab} U. \end{cases} \quad (7)$$

Перейдем к описанию модели объекта в переменных состояния. В качестве компонент вектора состояния были выбраны следующие величины:

$$x_1 = \theta, \quad x_2 = \dot{\theta}, \quad x_3 = \varphi, \quad x_4 = \dot{\varphi}. \quad (8)$$

В результате уравнения состояния примут следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{bd}{c^2 - ab} x_1 + \frac{bR}{c^2 - ab} x_2 + \frac{c}{c^2 - ab} U, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = -\frac{dc}{c^2 - ab} x_1 - \frac{cR}{c^2 - ab} x_2 - \frac{a}{c^2 - ab} U, \\ y_1 = x_1, \quad y_2 = x_3. \end{cases} \quad (9)$$

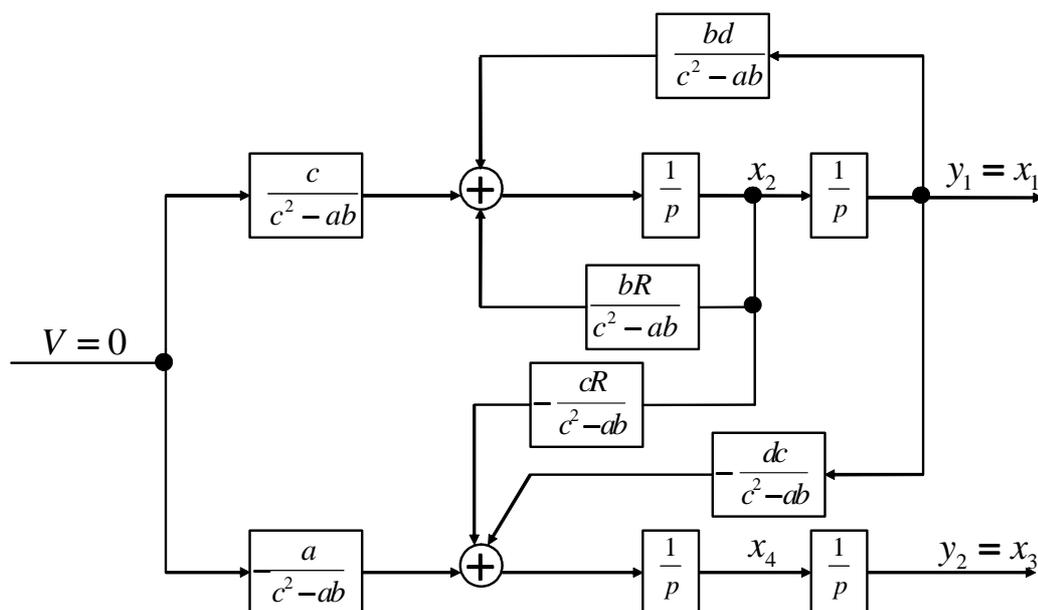


Рис.2. Структурная схема системы «вращающийся маятник»

Структурная схема объекта управления «вращающийся маятник», соответствующая уравнениям (9), представлена на рис.2.

Найдем множество равновесных состояний [5] системы, для чего приравняем производные в правой части (9) к нулю.

$$\begin{cases} 0 = \dot{x}_2, \\ 0 = \frac{bd}{c^2 - ab}x_1 + \frac{bR}{c^2 - ab}x_2 + \frac{c}{c^2 - ab}U, \\ 0 = \dot{x}_4, \\ 0 = -\frac{dc}{c^2 - ab}x_1 - \frac{cR}{c^2 - ab}x_2 - \frac{a}{c^2 - ab}U, \\ y_1 = x_1, y_2 = x_3. \end{cases} \quad (10)$$

Решив эту систему относительно неизвестных, получим состояния равновесия:

$$\begin{cases} x_1^0 = 0, \\ x_2^0 = -\frac{c}{bd}U \Rightarrow x_2^0 = 0 \text{ при } U = 0, \\ x_3^0 - \text{любое}, \\ x_4^0 = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Таким образом, для модели (9) задача стабилизации груза в нуле разрешима, так как эта точка принадлежит множеству равновесных состояний объекта, при этом угол  $\varphi$  может иметь любое значение.

С целью выбора алгоритма управления определим относительную старшую производную объекта. Под относительной старшей производной понимаем производную от  $y$ , которая явно зависит от управления и эта зависимость не вырождена [5]. Для определения относительной старшей производной по углу отклонения груза от вертикали необходимо последовательно дифференцировать первое уравнение выхода (9).

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = \dot{x}_1 = x_2, \\ \ddot{y}_1 = \dot{x}_2 = \frac{bd}{c^2 - ab}x_1 + \frac{bR}{c^2 - ab}x_2 + \\ + \frac{c}{c^2 - ab}U. \end{cases} \quad (12)$$

На основании (12) можно утверждать, что относительной старшей производной системы «вращающийся маятник» является вторая. Таким образом, если задаться желаемым уравнением:

$$\ddot{y} = F(\dot{y}, y), \quad (13)$$

то оно будет реализуемо во всех точках.

Поскольку порядок относительной старшей производной меньше порядка объекта, то в нем есть вырожденные движения. Порядок подсистемы вырожденных движений определяется как разница порядков объекта и относительной старшей производной и в данном случае равен двум. Реализация уравнения (13)

предполагает наличие устойчивых вырожденных движений.

Для выделения подсистемы вырожденных движений рассматривается следующая система уравнений:

$$\begin{cases} y = x_1 = 0, \\ \dot{y} = x_2 = 0. \end{cases} \quad (14)$$

Подставим (14) в (9), получим:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 0, \\ \dot{x}_2 = \frac{c}{c^2 - ab}U, \\ \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = -\frac{a}{c^2 - ab}U, \\ y_1 = x_1, y_2 = x_3. \end{cases} \quad (15)$$

Подсистема вырожденных движений описывается уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_3 = x_4, \\ \dot{x}_4 = -\frac{a}{c^2 - ab}U. \end{cases} \quad (16)$$

Таким образом, подсистемой вырожденных движений является подсистема «вращающаяся рука» и поскольку она линейная, ее легко проверить на устойчивость. Корни характеристического уравнения подсистемы (16) имеют значения:

$$\lambda_1 = 0, \quad \lambda_2 = 0,$$

поэтому она находится на границе устойчивости[5].

Это ограничивает применение для данного объекта практически любого из известных методов синтеза, особенно в случае, когда стоит задача не только обеспечить требование по стабилизации угла отклонения груза от вертикали, но и требование по стабилизации координаты вращающейся руки в ограниченном диапазоне.

### 3. РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА СТАБИЛИЗАЦИИ МОДЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ «ВРАЩАЮЩИЙСЯ МАЯТНИК»

В работе [6] были разработаны рекомендации по выбору алгоритма стабилизации системы «вращающийся маятник» с учетом ее особенностей.

Предложено формировать общее управление на систему как сумму двух составляющих:

$$U = U_1 + U_2, \quad (17)$$

где  $U_1$  – составляющая, позволяющая при помощи введения отрицательных обратных связей предварительно скорректировать вырожденную подсистему «вращающаяся рука», сделав ее устойчивой,  $U_2$  – составляющая

управления, которая будет сформирована для стабилизации угла отклонения груза от вертикали.

Для формирования  $U_1$  предлагается использовать пропорционально-дифференциальный (ПД) регулятор [7] в обратном канале и сформировать закон управления вида:

$$U_1 = k_p \varphi + k_d \dot{\varphi}, \quad (18)$$

где  $k_p$  – коэффициент пропорциональной составляющей,  $k_d$  – коэффициент дифференциальной составляющей определяются методом подбора.

Для формирования составляющей управления  $U_2$  с целью стабилизации угла отклонения груза от вертикали, предлагается использовать метод локализации (ПЛ-метод)[8]. При этом закон управления будет иметь вид:

$$U_2 = K(F(\theta, \dot{\theta}) - \ddot{\theta}), \quad (19)$$

где  $K$  - коэффициент усиления,  $F$ - уравнение желаемой динамики, которое задается, исходя из требований к качеству переходного процесса. Так как относительной старшей производной системы «вращающийся маятник» является вторая, то уравнение желаемой динамики может быть

линейным уравнением типа:

$$\ddot{\theta} = F = -a_1 \dot{\theta} - a_0 \theta. \quad (20)$$

#### 4. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР РАСЧЕТА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЫ

В Табл. 1 представлены численные значения объекта управления «вращающийся маятник».

Таблица 1

Параметр	Значение	Ед. изм.
$M$ , масса груза	0.1	кг
$l$ , длина маятника	1	м
$J_p$ , момент инерции маятника	0.02	кг·м <sup>2</sup>
$m$ , масса вращающейся руки	1	кг
$r$ , длина вращающейся руки	0.5	м
$R$ , коэффициент затухания колебаний	0.1	кг/с
$J$ , момент инерции вращающейся руки	0.25	кг·м <sup>2</sup>

Требование к качеству переходного процесса следующее:

$$t_n \leq 3 \text{ с.}$$

На рис. 3 представлена схема моделирования замкнутой системы при следующих численных параметрах регулятора:

$$a_0 = 15, a_1 = 3, k_d = 14, k_p = 4, K = 1.$$

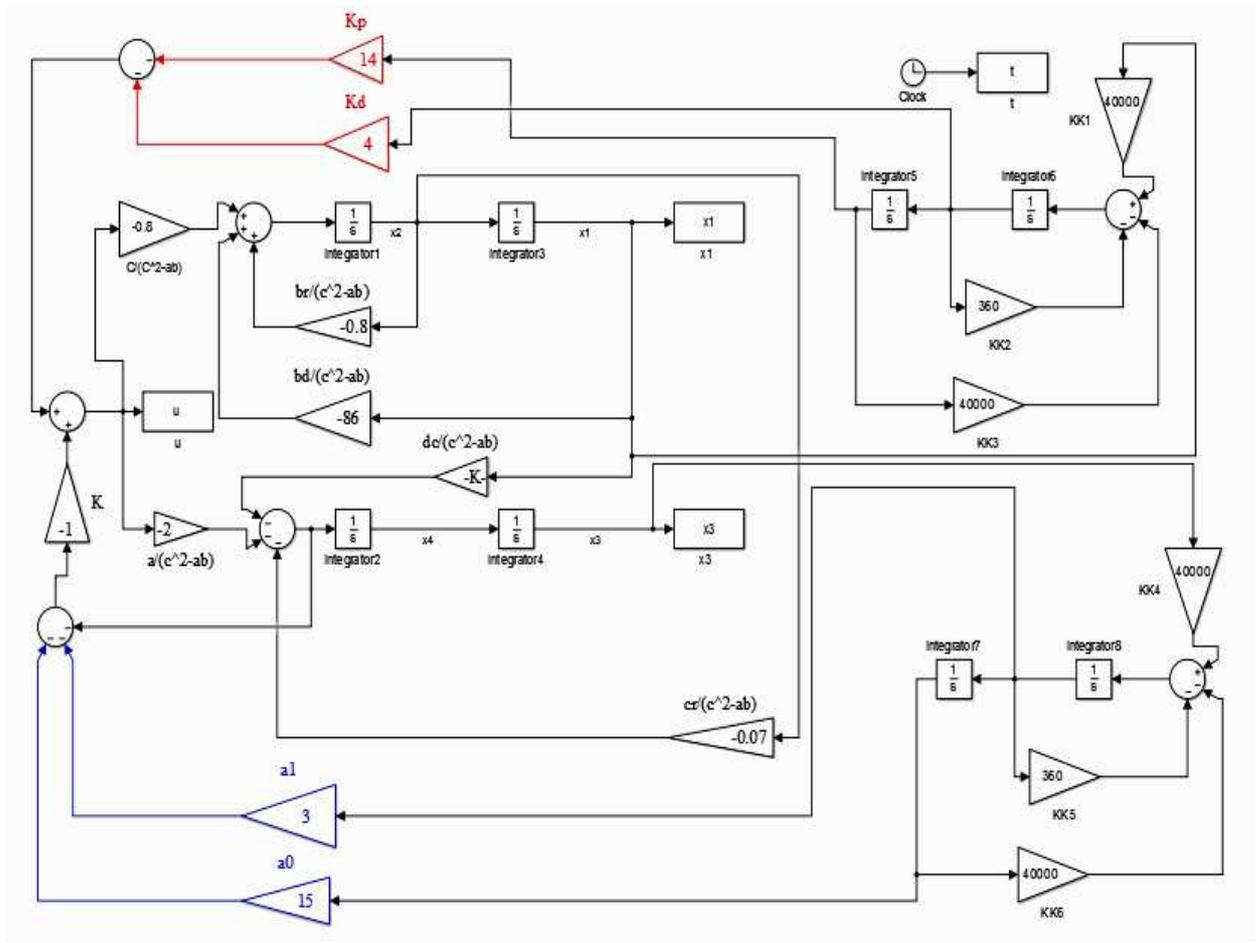


Рис.3. Структурная схема замкнутой системы с регулятором

На рис. 4. представлены переходные процессы по углу отклонения груза от вертикали и углу отклонения вращающейся руки в разомкнутой системе.

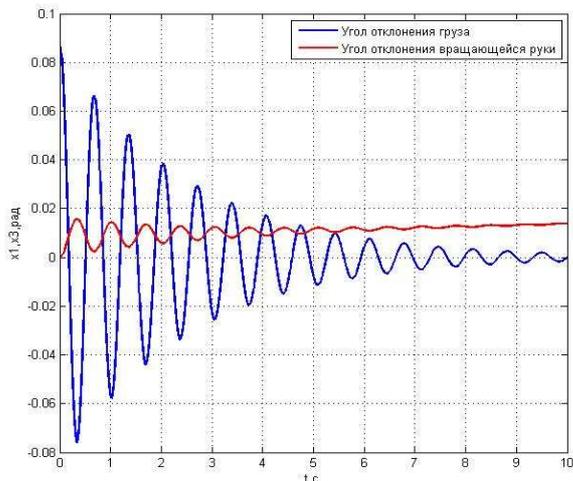


Рис.4. Переходные процессы в системе без регулятора при отклонении груза на величину 5 градусов

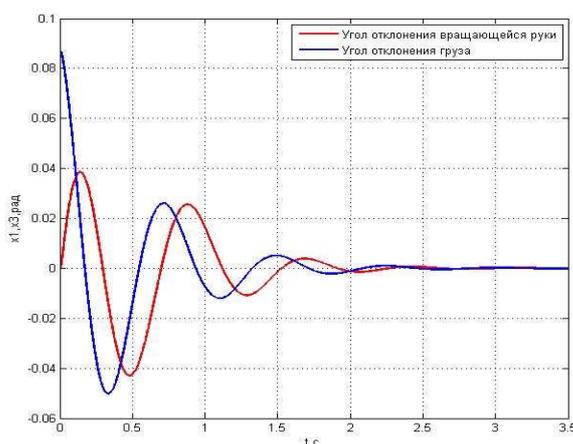


Рис.5. Переходные процессы в системе с регулятором при отклонении груза на величину 5 градусов

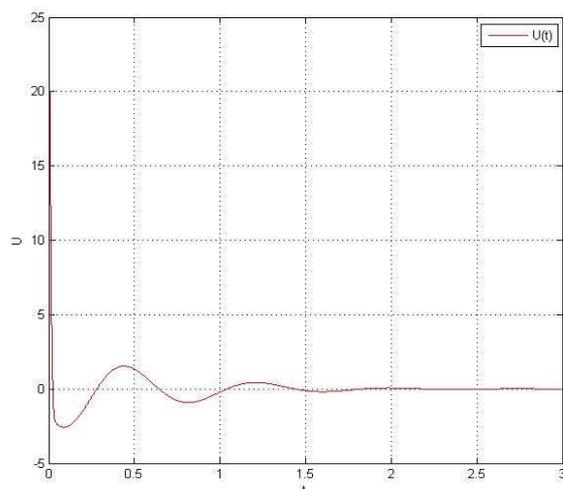


Рис.6. Переходный процесс по управляющему воздействию при начальном отклонении груза на величину 5 градусов

На рис. 5 и 6 представлены переходные процессы по углу отклонения груза от вертикали,

углу отклонения вращающейся руки и управляющему воздействию в замкнутой системе с регулятором.

Полученные графики переходных процессов позволяют сделать вывод о том, что в замкнутой системе удастся добиться требуемых свойств как по углу отклонения груза от вертикали, так и по углу отклонения вращающейся руки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье была рассмотрена возможность решения задачи стабилизации модельной системы «вращающийся маятник». Приведены нелинейные дифференциальные уравнения, описывающие поведение данной системы, и сформулирована задача синтеза. Осуществлен переход к линеаризованной модели, для которой проведен анализ ее основных качественных свойств. Предложен алгоритм стабилизации системы с учетом особенностей ее математической модели. Приведены результаты моделирования замкнутой системы в среде Matlab Simulink, подтверждающие работоспособность предложенного алгоритма стабилизации. В дальнейшем предполагается численная оптимизация регуляторов по методам, разработанным в публикациях [9–11].

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Саблина Г.В. Разработка и исследование методики стабилизации объекта управления «каретка-маятник»: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Новосибирск, 2000 г.
- [2] Саблина Г.В., Ходакова Д.И. Исследование математической модели системы «подвешенный груз». / Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск, 2009. – Вып. 2(56). – с. 11-18.
- [3] Саблина Г.В., Ходакова Д.И. Разработка алгоритма стабилизации системы «подвешенный груз». / Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск, 2009. – Вып. 3(57). – С. 33-40.
- [4] Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов.-13-е изд., исправленное. – М.: Наука, 1986.
- [5] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие – Новосибирск, 2003.
- [6] Саблина Г.В., Ходакова Д.И. Исследование свойств модельной системы «вращающийся маятник». / Сб. науч. тр. НГТУ. – Новосибирск, 2009. – Вып. 3(57). – С. 25-32.
- [7] Изерман Р. Цифровые системы управления. – М.: Мир, 1984.
- [8] Востриков А.С. Синтез нелинейных систем методом локализации. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1990.
- [9] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [10] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.

- [11] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>



Стажилов Иван Владимирович,  
магистрант кафедры автоматки.

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

## Development of Stabilization Algorithm of «Rotating Pendulum» Modeling System

Ivan Stazhilov

*Abstract:* In this article the possibility of stabilization problem decision of unstable «Rotating Pendulum» electromechanical system is discussed. The schematic representation of observable system is pictured and the nonlinear differential equations which describes of this system behavior are presented. The transition to reductive model is realized and the research of its main qualitative properties is executed. Modeling the closed-loop system in Matlab Simulink program environment is spent.

*Key words:* rotating pendulum, model, research, stabilization.

### REFERENCES

- [1] Sablina G.V. Development and research of methods of stabilization of control "carriage-pendulum": Autoreferate of dissertation for science degree of

- Cand. Technical Sciences (PhD). Novosibirsk, 2000.
- [2] Sablina G.V., Hodakova D.I. Investigation of a athenatical model of the system "suspended load". Collection of scientific works of NSTU. Novosibirsk, 2009. - Vol. 2 (56). p. 11-18.
- [3] Sablina G.V., Hodakova D.I. Development of an algorithm to stabilize the system "suspended load". Collection of scientific works of NSTU. Novosibirsk, 2009. - Vol. 3 (57). p. 33-40.
- [4] Bronstein, I.N., Semendyaev K.A. Handbook of mathematics for engineers and students of higher technical educational institutis, 13th ed., Revised. M.: Nauka, 1986.
- [5] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. Control Theory: Proc. Guide - Novosibirsk, 2003.
- [6] Sablina G.V., Hodakova D.I. Study of the properties of the model system "rotating pendulum". Collection of scientific works of NSTU. Novosibirsk, 2009. Vol.3(57). p. 25-32.
- [7] Izerman R. Digital control systems. M.: Mir, 1984.
- [8] Vostrikov A.S. Synthesis of nonlinear systems by method of localization. Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 1990.
- [9] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [10] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [11] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>

# Робастное проектирование ресурсосберегающего двухканального регулятора для объекта с одним выходом

В.А. Жмудь<sup>1</sup>, В.М. Семибаламут<sup>2</sup>, Л.В. Димитров<sup>3</sup>

<sup>1</sup> ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия, <sup>2</sup> ФГБУН Геофизическая служба СО РАН,

<sup>3</sup> Технический университет Софии, София, Болгария

**Аннотация:** Управление объектами в контуре с отрицательной обратной связью широко используется, поскольку позволяет обеспечить высокую точность в присутствии возмущающих воздействий. Робастным проектированием можно назвать проектирование такого регулятора, который обеспечит требуемую точность управления, то есть достаточно малые динамическую и статическую погрешности, даже в том случае, когда реальные параметры модели объекта и (или) реализованные коэффициенты регулятора отклоняются от тех численных значений, которые использованы при проектировании и (или) анализе системы. Робастные свойства регулятора могут быть обеспечены за счет достаточного запаса устойчивости, то есть даже если все ошибки в коэффициентах объекта и регулятора будут действовать в наихудшем направлении, то и в этом случае управление должно соответствовать требуемому качеству. Ресурсосберегающим регулятором является такой регулятор, который при условии решения поставленной задачи управления обеспечивает сбережение (минимальное расходование) ресурса, который требуется на изменение состояния объекта. Таким ресурсом может быть, например, топливо. Показателем такого ресурса служит интеграл от квадрата управляющего сигнала (воздействия). В данной статье исследуется метод решения задачи, когда на объект может воздействовать два различных вида воздействия, и при этом стоимость ресурса в каждом воздействии не одинакова. Предлагаемый метод и особенности его использования исследуются на примере.

**Ключевые слова:** управление, обратная связь, автоматика, регулятор, качество управления, точность

## ВВЕДЕНИЕ

Управление объектом с одной выходной величиной с использованием двух входных воздействий применяется достаточно широко, поскольку это позволяет совместить достоинство двух каналов и преодолеть их недостатки [1–5]. Этот метод может применяться при наличии

особых свойств объекта управления, которые состоят в том, что изменение выходной величины может происходить вследствие совокупных действий двух факторов, то есть объект может управляться по двум каналам воздействия. Целесообразность одновременного использования обоих каналов при этом диктуется тем, что каждый из каналов обладает недостатками, при этом недостатки одного из каналов не совпадают с недостатками другого канала. В противном случае следует использовать лучший канал, а худший не использовать.

В предшествующих публикациях [1–12] предложены и исследованы методы расчета регулятора. В частности, предложено использование графоаналитических методов [1–2], а также методов численной оптимизации [3–5]. Показано, что можно использовать программу *VisSim*, а в качестве стоимостной функции целесообразно использовать интеграл от модуля ошибки, умноженной на время с момента начала переходного процесса. Также рекомендовано вводить с весовыми коэффициентами дополнительные члены под интеграл стоимостной функции, такие как квадрат управляющего воздействия и другие.

Однако, в серии указанных статей еще не все вопросы, связанные с этим направлением теории автоматического управления, окончательно решены.

В частности, значительный интерес представляет использование в качестве дополнительного канала воздействия такого канала, который характеризуется крайне ограниченными возможностями, но при этом такой имеется весомый аргумент для его использования как экономия ресурса.

Важно исследовать, насколько такое использование может быть оправдано, можно ли обеспечить робастное управление, под которым в данном случае понимается достаточно малое влияние точности реализации рассчитанных коэффициентов (также как точности определения параметров математической модели объекта) на устойчивость системы, а также на вид переходного процесса.

Эти вопросы могут быть исследованы моделированием, однако, при этом необходимо осуществить достаточное количество подобных

экспериментов, с различными моделями объектов, поскольку некоторые проблемы могут не проявить себя в некоторых частных случаях, но в других случаях стать непреодолимыми.

В данной статье решается вопрос численной оптимизации ПД-регулятора для объекта, содержащего два канала управления, каждый из которых содержит интегральную компоненту. При этом в каждом канале содержится фильтр второго порядка, а в «худшем» канале дополнительно содержится нелинейный элемент, преобразующий непрерывный сигнал в дискретный, на выходе которого имеется дифференцирующее звено. Это делает канал крайне не эффективным в чистом виде, что делает актуальным исследование вопроса целесообразности применения такого канала совместно с «лучшим» каналом, свободным от указанной нелинейности.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим объект, математическая модель которого задана суммой двух каналов воздействия. Исследуем метод численной оптимизации для расчета регулятора, основанный на стоимостной функции, содержащей затраты энергии. Кроме того, используем различную стоимость ресурса управления при одинаковом статическом коэффициенте передачи каждого канала управления. Естественно предположить, что цена ресурса, который используется при управлении по «худшему» каналу, намного ниже, чем цена ресурса управления по «лучшему» каналу (первому). Иначе «худший» канал (второй) не может быть полезен.

Поскольку используется критерий, включающий экономию ресурса, целесообразно рассматривать класс объектов, содержащих интегратор. В структуре модели общий для обоих каналов управления интегратор может быть вынесен за сумматор.

Пусть передаточная функция первого канала имеет следующий вид:

$$W_1(s) = \frac{1}{0,1s^2 + 0,5s + 1} \cdot \frac{1}{s}. \quad (1)$$

Здесь  $s$  – аргумент преобразования Лапласа.

Передаточная функция второго канала пусть имеет вид:

$$W_2(s) = \frac{1}{s^2 + 2s + 1} \cdot \frac{1}{s}. \quad (2)$$

Эта передаточная функция (2) не полностью описывает второй канал управления. Для того, чтобы описать его более слабые возможности по управлению на входе этого канала, введем в модель второго канала нелинейный элемент и последовательно с ним включенное

дифференцирующее звено. Это дифференцирующее звено, естественно, компенсирует эффект интегратора, поэтому воздействие по второму каналу не влияет на скорость изменения выходной величины, а лишь привносит почти ступенчатые изменения ее подобно тому, как отброшенная ступень в момент ее отбрасывания может изменить скорость космического корабля за счет эффекта реактивного воздействия. Зададим дискретность нелинейного элемента величиной шага 0,2 единицы. Зададим соотношение стоимостей ресурсов управления как 1:50.

## 2. МЕТОД РЕШЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ

### 2.1. Метод решения задачи

Метод состоит в численной оптимизации с использованием программы *VisSim*. При этом структура регулятора содержит два канала, каждый из которых состоит из пропорционального и дифференцирующего трактов, выходы которых суммируются. Во второй тракт рекомендуем ввести элемент «зона нечувствительности», на основании результатов, описанных в нашей работе [6]. Ширина зоны нечувствительности соизмерима с величиной дискретности нелинейного элемента второго канала в модели объекта, но точного соответствия достичь невозможно, поскольку эта нелинейность устанавливается не на выходе этого канала регулятора, а на его входе. Таким образом, в нашем случае ширина зоны нечувствительности равна 0,3; шаг дискретности в модели второго канала управления равен 0,2.

Для сравнения используем два варианта целевой функции. В первом варианте это интеграл от модуля ошибки, умноженного на время с начала переходного процесса. Во втором варианте введем под интеграл взвешенную сумму квадратов управляющих сигналов, формируемых на выходах регулятора.

### 2.2. Результат без внесения в целевую функцию стоимостного слагаемого

На *Рис. 1* показана структурная схема для моделирования и оптимизации регулятора в соответствии с моделью объекта и предложенным методом решения задачи по первому варианту. Стартовые значения всех параметров регулятора для процедуры оптимизации взяты равными единице. В результате процедуры получены значения, которые показаны в индикаторах справа внизу на *Рис. 1*. На *Рис. 2* показан блок для вычисления расхода ресурса за время переходного процесса. Этот расход составил 3,28 единицы.

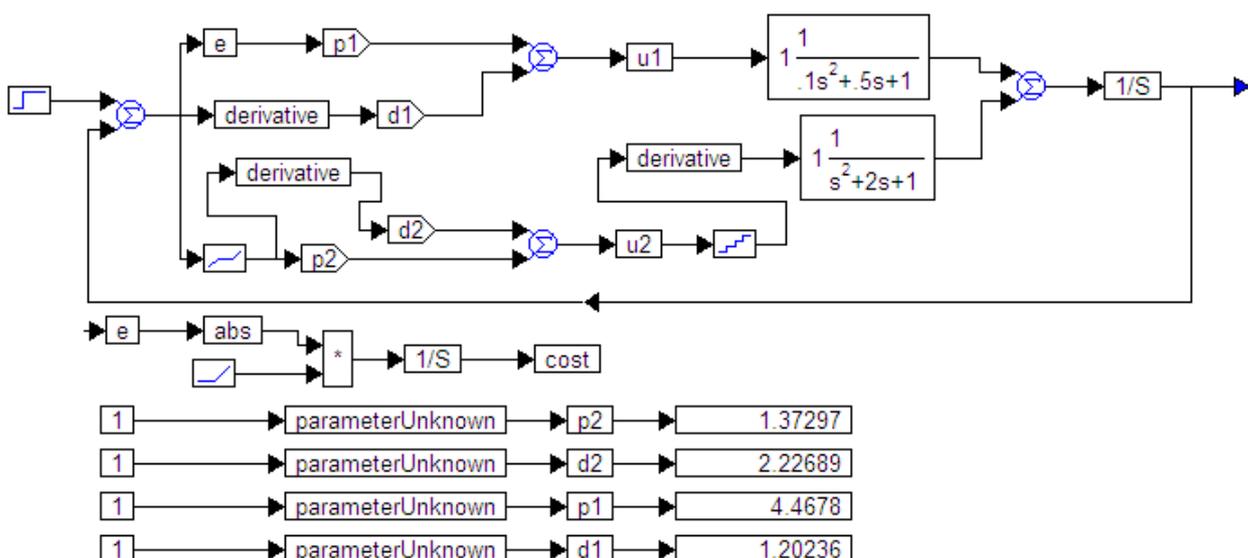


Рис. 1. Схема для моделирования и оптимизации регулятора в программе VisSim



Рис. 2. Схема блока для расчета стоимости затрат ресурса управления

На Рис. 3 показан переходный процесс в системе с рассчитанным регулятором. Длительность процесса составляет чуть более 6 секунд, имеется небольшое перерегулирование около 2 %, число заметных колебаний равно трем.

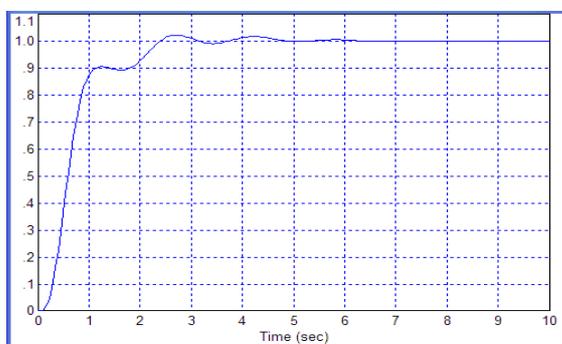


Рис. 3. Переходный процесс в системе по Рис. 1

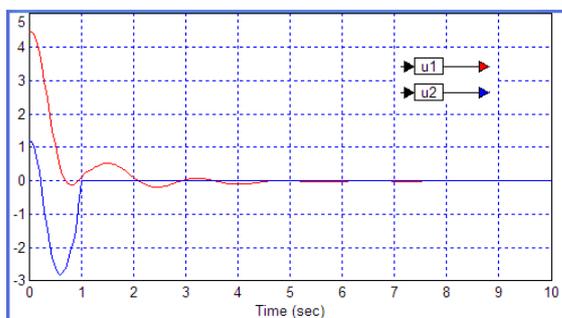


Рис. 4. Изменения управляющих сигналов в двух разных каналах в системе по Рис. 1

### 2.3. Результат после внесения в целевую функцию стоимостного слагаемого

Введем в стоимостную функцию выход блока для расчета стоимости ресурса управления и повторно осуществим численную оптимизацию коэффициентов регулятора. Полученные коэффициенты регулятора также приведены в индикаторах справа внизу. Видно, что стоимость ресурса управления составила 0,608 единиц, что более чем в пять раз ниже, чем без использования этого метода. Соответствующие переходные процессы в этой системе показаны на Рис. 6 и 7. Видно, что переходный процесс объективно улучшился, а именно: время процесса сократилось до 4,5 секунд, то есть на четверть от предыдущего результата. Перерегулирование полностью отсутствует. Колебаний около равновесного состояния практически нет, имеется лишь одна волна обратного колебания, то есть, можно сказать, половина колебания.

Снижение стоимости управляющего ресурса обеспечено тем, что дорогостоящий ресурс первого канала управления используется меньше: пиковое значение снижено от 4,5 единиц до величины менее 1,5 единиц. Более дешевый ресурс управления во втором канале также используется более экономно: пиковые значения его были +1 и -3, а стали +0,3 и -0,1.

**Примечание:** В структуре на Рис. 5 интегратор от вычислителя стоимости затрат ресурса не используется, поскольку в вычислителе стоимостной функции уже имеется свой интегратор. Можно было перенести сумматор, установив его на выходе интегратора, это не принципиально, экономии количества блоков в схеме не было бы в любом случае.

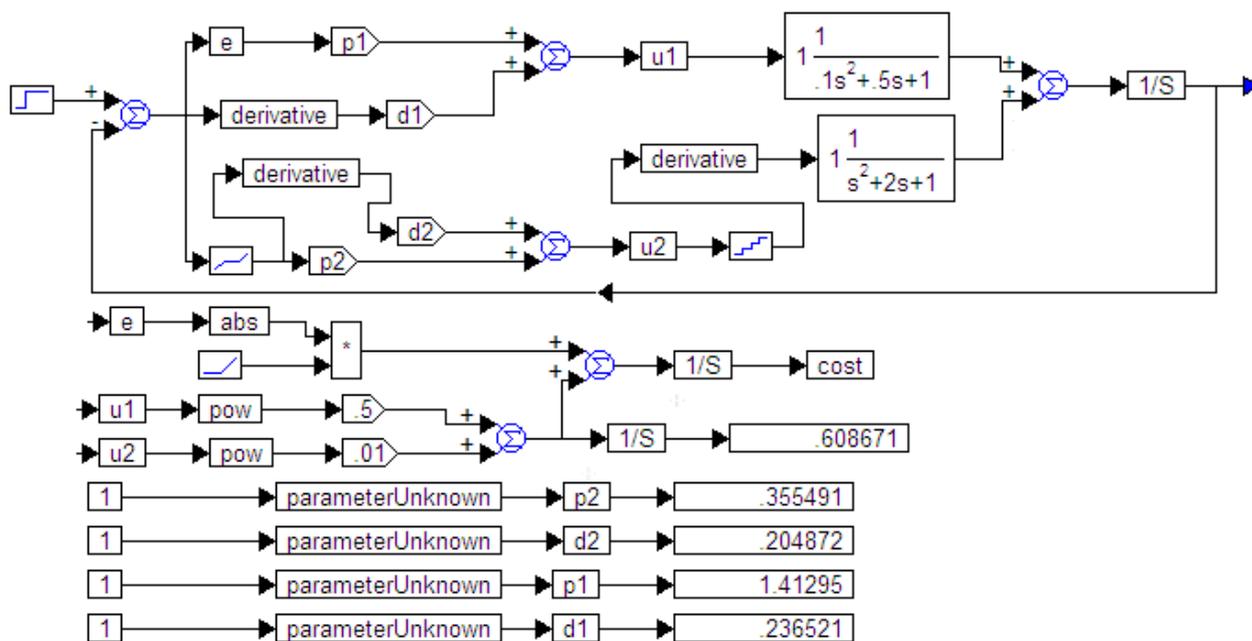


Рис. 5. Схема для моделирования и оптимизации регулятора с учетом стоимости ресурса управления и результаты численной оптимизации коэффициентов регулятора

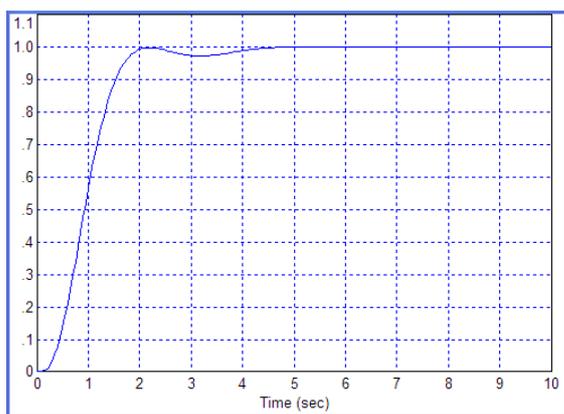


Рис. 6. Переходный процесс в системе по Рис. 5

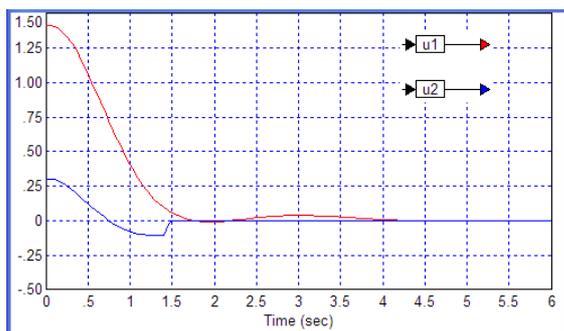


Рис. 7. Изменения управляющих сигналов в двух разных каналах в системе по Рис. 5

**Вывод 1.** Введение в стоимостную функцию результата вычисления ресурса управления в виде интеграла от взвешенной суммы квадратов позволяет снизить расход ресурса, а также улучшить качество управления. Указанное улучшение качества включает повышение быстродействия, уменьшение или устранение

перерегулирования, снижение количества колебаний в переходном процессе. Данный вывод справедлив, в том числе, применительно к системе управления одной выходной величиной по двум каналам воздействия, в том числе при различных стоимостях ресурса по разным каналам. Это относится, в том числе, к случаю, когда один из каналов содержит дискретный по уровню преобразователь. Все сказанное в данном выводе справедливо, по меньшей мере, для одного исследованного примера. С учетом результатов в статье [6] таких примеров несколько.

Пример для исследований был взят наугад, а не выбран специально для подтверждения тезисов, сформулированных в Выводе 1. Это позволяет предполагать справедливость Вывода 1, как минимум, для достаточно широкого класса объектов.

### 3. ПРОБЛЕМЫ С ОБЪЕКТОМ, СКЛОННЫМ К КОЛЕБАНИЯМ И ЕЕ РЕШЕНИЕ

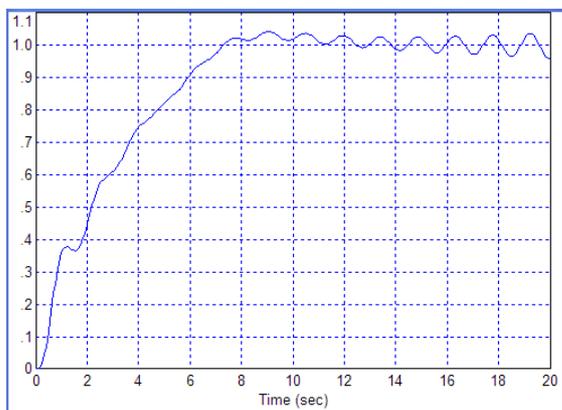
#### 3.1. Нарушение устойчивости

Рассмотрим предыдущий пример, изменив модель первого (лучшего) канала управления в худшую сторону, а именно: повысим склонность к колебаниям. Для этого достаточно коэффициент в полиноме знаменателя при  $s$  в первой степени уменьшить, например, в пять раз. Новая передаточная функция объекта будет иметь вид:

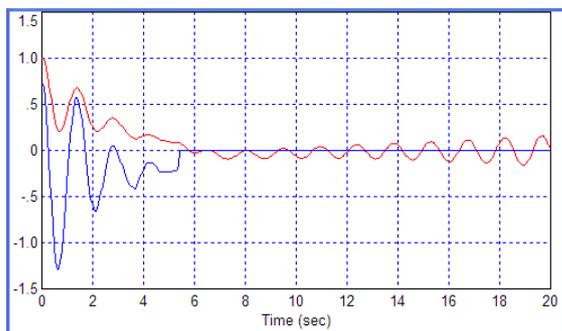
$$W_1(s) = \frac{1}{0,1s^2 + 0,1s + 1} \cdot \frac{1}{s} \quad (3)$$

Оптимизация по структуре, аналогичной той, которая показана на Рис. 1, дает коэффициенты регулятора:  $p_1 = 0,467781$ ;  $d_1 = 3,11038$ ;  $p_2 = 1,0038$ ;  $d_2 = 0,956992$ . При этом стоимость

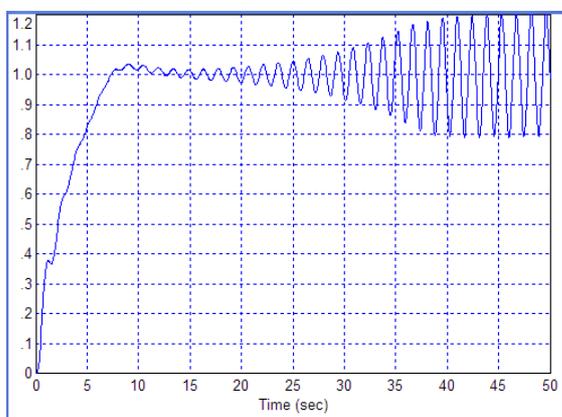
расхода ресурса составляет  $F = 0,467781$ . На *Рис. 8* и *9* показаны соответствующие переходные процессы в системе. Видно, что процесс на *Рис. 8* неудовлетворительный, поскольку в нем развиваются колебания около равновесного состояния, которые не только не затухают, но, наоборот, возрастают по амплитуде, что свидетельствует о неустойчивости системы. Для наглядности на *Рис. 10* приведен переходный процесс за более длительное время.



*Рис. 8.* Переходный процесс в системе по *Рис. 5* с параметрами передаточной функции первого канала по соотношению (3)



*Рис. 9.* Изменения управляющих сигналов в двух разных каналах в системе по *Рис. 5* с параметрами передаточной функции первого канала по соотношению (3)

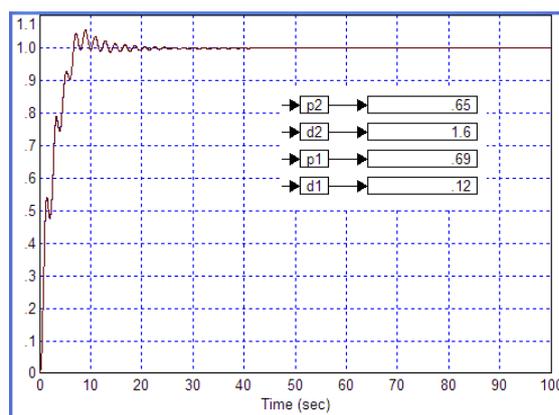


*Рис. 10.* Переходный процесс, в тех же условиях, что на *Рис. 8*, за более длительный интервал времени

### 3.2. Обеспечение устойчивости

Для обеспечения устойчивости увеличим интервал моделирования до 50 с, то есть в 2,5 раза. Также снизим зону нечувствительности в полтора раза до величины 0,2.

Получим следующее:  $p_1 = 0,646981$ ;  $d_1 = 1,61526$ ;  $p_2 = 0,686261$ ;  $d_2 = 0,118547$ . При этом стоимость расхода ресурса составляет  $F = 0,28267$ . Отметим, что в целом при изменении интервала моделирования стоимость ресурса сравнивать было бы не корректно, если бы в математической модели объекта не содержался интегратор. При наличии интегратора управляющие сигналы по завершении переходного процесса асимптотически стремятся к нулю, поэтому увеличение длительности моделирования при устойчивом управлении не существенно влияет на расход ресурса управления, поэтому полученные результаты можно сопоставлять. На *Рис. 11* и *12* показаны соответствующие переходные процессы в полученной системе. При этом для того, чтобы убедиться с робастной устойчивости системы, увеличим время моделирования еще вдвое, то есть до 100 с, а рассчитанные коэффициенты регулятора округлим так, чтобы остались только две значащие цифры, то есть  $p_1 = 0,65$ ;  $d_1 = 1,6$ ;  $p_2 = 0,69$ ;  $d_2 = 0,12$ . Как видим, процесс, показанный на *Рис. 11*, является устойчивым. Отметим, что отличие этого процесса вследствие округления коэффициентов от процесса с неокругленными коэффициентами пренебрежимо мало, на графике визуально никак не проявляется (графики сливаются). На *Рис. 12* показаны соответствующие управляющие сигналы, время на этом графике для наглядности укорочено, масштаб сигнала укрупнен.



*Рис. 11.* Переходный процесс в системе

**Вывод 2.** Для получения робастных регуляторов полезным может оказаться увеличение времени моделирования.

**Вывод 3.** Правильный выбор величины зоны нечувствительности также может обеспечить успешность решения задачи численной оптимизации регулятора.

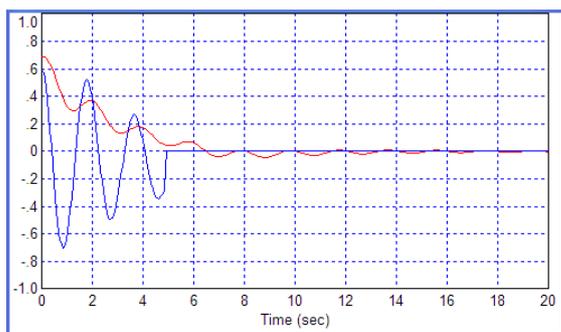


Рис. 12. Изменения управляющих сигналов в двух разных каналах в системе

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] A phase-locked loop system for the difference frequency of two lasers. Barmasov S.V., Zhmud' V.A. Instruments and Experimental Techniques. 2000. Т. 43. № 3. P. 381-383.
- [2] Электронная система стабилизации частоты He-Ne лазера по линиям поглощения метана. Жмудь В.А., Бармасов С.В., Гительсон В.Д. Приборы и техника эксперимента. 1999. № 4. С. 127.
- [3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10 – 13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [4] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Монография. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [5] В.А. Васильев, А.А. Воевода, В.А. Жмудь, В.А. Хассуонех. Цифровые регуляторы: целевые функции настройки, выбор метода интегрирования, аппаратная реализация. Сборник научных трудов НГТУ, 2006. N 4 (46). С. 3–10.
- [6] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.
- [7] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [8] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012.

- Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [9] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
  - [10] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
  - [11] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
  - [12] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>



**Вадим Аркадьевич Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника. E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)



**Владимир Михайлович Семибаламут** – директор ФГБУН «Геофизическая служба СО РАН». Область научных интересов и компетенций: автоматизация научного эксперимента, лазерная физика, геофизика, программное обеспечение, оптимизация. E-mail: [wladim28@yandex.ru](mailto:wladim28@yandex.ru)



Lubomir Dimitrov Vankov – Dean of engineering faculty of the Technical University of Sofia, Doctor, Professor, Bulgaria, the author of over 200 scientific articles. Research interests: mechatronics, automation, microelectronic modules and their application (MEMS). E-mail: [lubomir\\_dimitrov@tu-sofia.bg](mailto:lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg)

## Robust Design of Resource-Saving Dual-Channel Regulator for an Object with a Single Output

V.A. ZHMUD, V.M. SEMIBALAMUT,  
L.V. DIMITROV

*Abstract.* Control of objects in the loop with negative feedback is widely used because it allows achieving high accuracy in the presence of disturbances. Robust design can be called design of such regulator which provides the required control

accuracy, that is small enough dynamic and static errors, even in the case where the actual parameters of the model of the object and (or) implemented coefficients of the regulator deviate from those numerical values which were used in design and (or) analysis system. Robust control properties can be provided by a sufficient safety factor, i.e. if all the errors of the coefficients of the object and regulator will change in the worst direction, even in this case, the control should match the desired quality. Resource-saving regulator is regulator that provided the solution of the control task and provides savings (minimum consumption) of the resource that is necessary for the changing of the state of the object. Such resource can be, for example, fuel. An indicator of this resource is the integral of the square of the control signal (impact). This paper explores a method of solving the problem, when two different types of actions can affect to the object, and thus the value of the resource in each exposure is not the same. The proposed method and the features of its use are investigated by the example.

*Key words:* Control, feedback, automation, regulator, quality control, precision

## REFERENCES

- [1] A phase-locked loop system for the difference frequency of two lasers. Barmasov S.V., Zhmud' V.A. Instruments and Experimental Techniques. 2000. T. 43. № 3. P. 381-383.
- [2] An electronic system for stabilizing of the frequency of the He-Ne laser to the methane absorption lines. Zhmud V.A., Barmasov S.V., Gitel'son V.D. Instruments and Experimental Techniques. 1999. T. 42. № 4. P. 551-557.
- [3] V. A. Zhmud. The Use of the Feedback Control Systems in Laser Physics Researching Experiments. // Proceedings of RFBR and DST Sponsored "The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics", 10–13 September, 2011, Additional volume, pp.40–43.
- [4] Zhmud V.A. Simulation study and optimization of locked systems of automatic control. Monograph. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. - 335 p.
- [5] Vasiliev V.A., Voevoda A.A., Zhmud V.A., Hassuoneh V.A. Digital controls: setting of target function, the choice of integration method, hardware implementation. Collection of scientific works NSTU, 2006. N 4 (46). p. 3-10.
- [6] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Method of designing energy-efficient regulators for complex objects with partially unknown model. Proc.: The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30-July 3, 2014, Samara. Russia. p. 557-567.
- [7] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimtsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [8] Modern key technologies in automatics: Structures and numerical optimization of regulators. Zhmud, V., Yadrishnikov, O., Poloshchuk, A., Zavorin, A. 2012. Proceedings - 2012 7th International Forum on Strategic Technology, IFOST 2012.
- [9] The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program vissim 5.0/6. Zhmud, V., Liapidevskiy, A., Prokhorenko, E. 2010. Proceedings of the IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control. PP. 27–32.
- [10] V. Zhmud, O. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [11] V. Zhmud, A. Polishchuk, A. Voevoda, R. V. Rao. The Tuning of the PID-Regulator for Automatic Control System of Thermo Energetic Equipment // Proceedings of the Fifth International Conference on Advances in Mechanical Engineering (ICAME-2011), June 06-08, 2011. Surat – 395 007, Gujarat, India. pp. 254-263.
- [12] Zhmud V.A., Zavorin A.N. Metodi di ottimizzazione del controllo numerico su una modelli troncati. Italian Science Review. 2014; 4(13). PP. 686-689. Available at URL: <http://www.ias-journal.org/archive/2014/april/Zhmud.pdf> and <http://www.ias-journal.org/archives/april-2014>

# Сравнительный анализ возможностей типовых регуляторов и регуляторов по методу локализации

Г.А. Французова, Е.П. Толстоконева, Н.Ю. Шилкова  
НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В работе предложен сравнительный анализ возможностей систем с ПИД-регулятором, коэффициенты которого получены на основании спектрального и частотного методов, а также с регулятором, рассчитанным с помощью метода локализации. Проведено исследование отработки системой с различными регуляторами нестационарных параметров объекта управления и различных возмущающих воздействий.

**Ключевые слова:** автоматика, ПИД-регулятор, метод локализации, дифференцирующий фильтр, нестационарные параметры, внешнее возмущение.

## ВВЕДЕНИЕ

Типовые регуляторы широко применяются в промышленности на протяжении многих десятилетий и не утратили свою актуальность и в настоящее время. Причинами столь высокой популярности являются простота построения и промышленного использования, изученность свойств и принципа действия, пригодность для решения большинства практических задач и низкая стоимость. Всё вышеперечисленное – неоспоримые достоинства типовых регуляторов.

Для реализации своих преимуществ типовые регуляторы требуют настройки. Разные авторы – Зиглер (или в некоторых источниках Циглер), Николс, Чин, Хронес, Ресвик и многие другие – предлагали множество подходов к расчёту коэффициентов регулятора [1–4, 7, 8], а также их численной оптимизации [9–11]. Выбор способа этой настройки не прост, поскольку каждый из таких способов обладает как достоинствами, так и недостатками. Но даже при наилучшей настройке регулятор позволяет лишь приближенно обеспечить требуемое качество переходного процесса, если параметры объекта изменяются, и на него воздействуют неизвестные внешние возмущения.

При наличии объектов с нелинейными характеристиками или изменяющимися параметрами, а также при действии возмущений целесообразно использовать регулятор, рассчитанный методом локализации [5, 6]. Благодаря использованию старшей производной выходной переменной в обратной связи, все свойства объекта и действие возмущений с

начального момента времени обрабатываются с помощью сигнала управления. Преимущества данного метода не только в том, что он работает даже при действии возмущений, но и в том, что необязательно знать все свойства объекта.

Так как для объекта второго порядка структура типового регулятора близка к структуре регулятора на основе метода локализации, то целесообразно сравнивать возможности этих двух типов систем управления. Цель настоящей работы – сформулировать рекомендации к выбору регулятора на основании проведённых исследований.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе рассматривается динамический объект, модель которого имеет вид:

$$\ddot{y} + a_1(t)\dot{y} + a_2(t)y = b(t)u, \quad (1)$$

где параметры  $a_i$  могут изменяться в ограниченном диапазоне:

$$a_{i\min} \leq a_i(t) \leq a_{i\max}, \quad i = 1, 2.$$

При номинальных значениях параметров модель (1) становится стационарной и может быть описана передаточной функцией:

$$W(p) = \frac{K_0}{T^2 p^2 + 2dTp + 1}, \quad (2)$$

где  $K_0$  – коэффициент усиления,  $T$  – постоянная времени,  $d$  – коэффициент демпфирования.

Для системы, состоящей из объекта управления (2) и регулятора, необходимо обеспечить определенные требования к качеству переходного процесса, которые, как правило, задаются в виде следующих оценок:  $t_n$ ,  $\sigma$ ,  $\Delta^0$ .

## 2. ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА РЕГУЛЯТОРОВ

Первые попытки настройки типовых регуляторов были предприняты ещё в начале XX века. Методы Чина–Хронеса, Циглера–Николса [1], предложенные одними из первых, дают весьма приблизительные результаты. Расчет ПИД-регулятора данными методами основан на анализе переходного процесса [2].

Рассмотрим наиболее современные подходы: частотный и спектральный [3]. При этом будем рассматривать типовой ПИД-регулятор [4], идеальная модель которого имеет следующий

вид:

$$W_{PID}(p) = \frac{K_D p^2 + K_P p + K_I}{p}, \quad (3)$$

где  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  – коэффициенты усиления пропорциональной, интегральной и дифференцирующей составляющих ПИД-регулятора соответственно.

Из формулы (3) видно, что включение ПИД-регулятора вносит в систему два нуля  $z_1$ ,  $z_2$  и полюс  $p = 0$ , расположенный в начале координат и увеличивающий степень астатизма системы на единицу. В зависимости от знаков и модулей параметров  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  возможны различные значения корней  $z$  и постоянных времени  $T = -z^{-1}$  [3]. Передаточную функцию регулятора (3) можно представить в следующем виде:

$$W_{PID}(p) = \frac{K_I(1+T_I p)(1+T_D p)}{p}, \quad (4)$$

где  $T_I$  и  $T_D$  – постоянные времени интегрального и дифференцирующего каналов соответственно.

При этом параметры  $T_I$  и  $T_D$  в (4) могут быть найдены из параметров соотношения (3) с помощью следующих уравнений связи [3]:

$$K_P = K_I(T_I + T_D), \quad K_D = K_I T_I T_D.$$

Отметим, что  $K_I$  в (3) или (4) выбирается из условия:  $K_I \geq 1/(K_o \Delta_0)$ , где  $\Delta_0$  – допустимая статическая ошибка.

**Частотный метод**, представленный в работе [3], предполагает быстрый приближенный расчёт параметров ПИД-регулятора, нацеленный на достижение минимальной скорости ошибки и максимального быстродействия.

Алгоритм синтеза ПИД-регулятора данным методом имеет следующий вид:

- строятся ЛАЧХ объекта, на осях ординат отмечаются уровни запаса по амплитуде и фазе. Выбирается частота запаса желаемого разомкнутого контура  $\omega_L$  из условия максимального быстродействия;
- выбирается частота сопряжения  $\omega_D$  и постоянная времени  $T_D$  дифференциального канала:

$$\omega_D \approx 0,1\omega_L; T_D \approx 10 / \omega_L;$$

- строятся частотные характеристики последовательного соединения объекта с форсирующим звеном  $(T_D p + 1)$ , контролируя при этом запас устойчивости по фазе;
- получаем из разности  $\Delta L$  уровня запаса по амплитуде самого объекта и амплитуды логарифмической характеристики объекта с форсирующим звеном коэффициент усиления пропорционального канала регулятора  $K_P: K_P \leq 10^{0,05\Delta L}$ ;
- выбираем постоянную времени интегрального канала из условия достижения минимальной

скоростной ошибки:

$$\omega_i \leq \omega_D, \quad T_i \geq T_D.$$

Используя соотношение (5), вычисляем коэффициенты усиления интегрального и дифференцирующего каналов ПИД-регулятора:

$$K_I = \frac{K_P}{T_I + T_D}, \quad K_D = \frac{K_P T_I T_D}{T_I + T_D}.$$

**Спектральный метод** – это также распространенный способ расчета ПИД-регулятора [3], который предполагает компенсацию нулями регулятора нежелательных полюсов объекта и навязывание желаемых динамических свойств путём размещения полюсов в нужных участках комплексной плоскости.

Обе процедуры предполагают расчет идеального регулятора (3). Для реализации на практике дифференцирующей составляющей необходимо предусмотреть ее измерение с помощью специального устройства, называемого дифференцирующим фильтром [5].

В результате передаточная функция ПИД-регулятора принимает вид:

$$W_{PID}(p) = K_P + \frac{K_I}{p} + \frac{K_D p}{\mu p + 1}, \quad (3)$$

где  $\mu$  – постоянная времени фильтра. Как правило, данный параметр выбирается на порядок меньше постоянной времени дифференцирующего канала.

**Метод локализации** [5, 6] заключается в использовании в обратной связи старшей производной выходной переменной объекта (1). Данный подход позволяет быстро получать в неявном виде полную информацию об объекте и обрабатывать возмущения с помощью управления.

Закон управления этого типа для объекта (1) имеет вид:

$$u(t) = K[F(y, \dot{y}) - \ddot{y}], \quad (6)$$

где  $K$  – коэффициент усиления,  $F(y, \dot{y})$  – функция, которая отражает требования к качеству процесса в системе и формируется в виде линейного дифференциального уравнения на основе модального подхода [5]. Обычно в зависимости от требуемой точности коэффициент регулятора можно выбирать в диапазоне:

$$|b_{\min}| K \approx (20 \div 100).$$

В этом случае замкнутая система с регулятором примет вид:

$$\ddot{y} = \frac{f(\cdot)}{1+b(\cdot)K} + \frac{b(\cdot)K}{1+b(\cdot)K} F(\cdot).$$

При увеличении коэффициента  $K$  процессы будут стремиться к желаемым. Реализация такого регулятора предполагает наличие оценок производных выходного сигнала, включая старшую (в данном случае вторую). С этой целью используется дифференцирующий фильтр:

$$W_f = \frac{1}{\mu^2 p^2 + 2d\mu p + 1}$$

При этом его постоянная времени выбирается из условия: процессы в фильтре должны заканчиваться на порядок быстрее, чем в системе, а коэффициент демпфирования – из условия быстродействия и отсутствия колебаний, т. е., как правило, в диапазоне  $d \approx (0,5 \dots 0,7)$ .

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СИСТЕМЫ

В качестве примера будем рассматривать объект (1), параметры которого могут изменяться в диапазоне:  $3,5 \leq K_o \leq 6,5$ ;  $0,98 \leq T \leq 1,82$ ;  $0,12 \leq d \leq 0,23$ . Номинальные значения параметров:  $K_o = 5$ ,  $T = 1,414$ ,  $d = 0,177$ . Требования к качеству переходного процесса заданы в виде оценок:  $t_n \leq 3c$ ;  $\sigma \leq 30\%$ ;  $\Delta^0 \leq 5\%$ .

Коэффициенты типового регулятора, рассчитанные частотным методом для данного объекта, имеют следующие значения:  $K_P = 15$ ;  $K_I = 2,57$ ;  $K_D = 21,43$ .

При расчете типового регулятора спектральным методом получили следующие значения параметров:  $K_P = 2$ ;  $K_I = 4$ ;  $K_D = 8$ . Постоянная времени фильтра  $\mu = 0,01$ .

При расчете регулятора методом локализации составляем желаемое уравнение, используя модальный подход [5] в виде:

$$\ddot{y} = -4\dot{y} - 8y + 8.$$

Выберем коэффициент усиления регулятора  $K = 8$ . Параметры дифференцирующего фильтра приняли следующими:  $\mu = 0,05$ ;  $d = 0,7$ .

На Рис. 1 представлены графики переходного процесса в замкнутой системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны частотным и спектральным методами (4), (5) и с регулятором на основе метода локализации. Как видно из этого Рис. 1, переходные процессы в системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны частотным методом, незначительно отличаются от процесса в системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны спектральным методом. Переходный процесс в системе с ПИД-регулятором длится на порядок быстрее заданных требований. В системе с регулятором, рассчитанным методом локализации, процесс полностью соответствует заданной длительности. Кроме того, его перерегулирование сравнимо с перерегулированием переходного процесса в системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны частотным методом. Все переходные процессы обладают качеством, удовлетворяющим заданным требованиям. Однако отметим, что время переходного процесса меньше в системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны частотным методом, наименьшее перерегулирование в системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны спектральным методом.

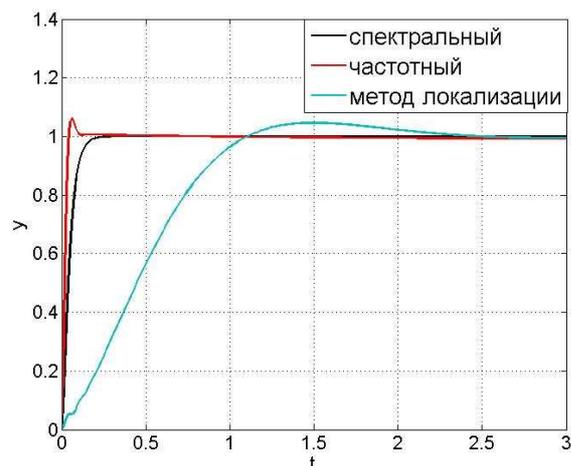


Рис.1. Изменение выходной величины в системах с различными регуляторами

Исследуем возможности регуляторов при изменении параметров объекта. Полагаем, что постоянная времени объекта управления (2) от процесса к процессу изменяется на 30%.

Рис. 2 и 3 иллюстрируют переходные процессы в системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны частотным методом, и графики изменения управляющего воздействия соответственно.

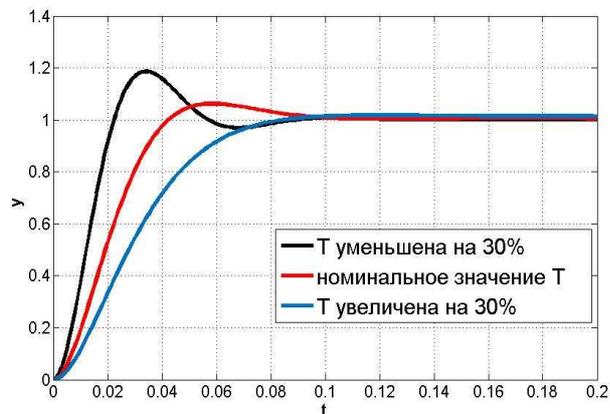


Рис.2. Влияние постоянной времени в системе с ПИД-регулятором (частотный метод)

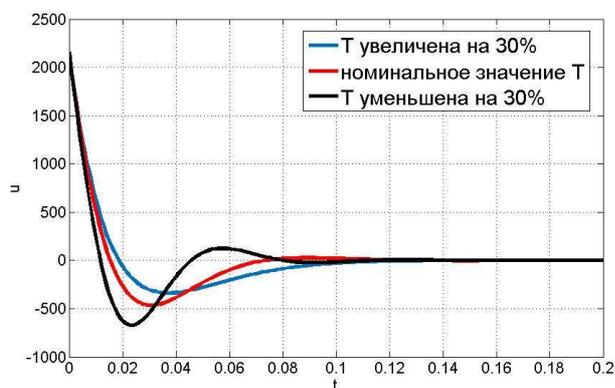
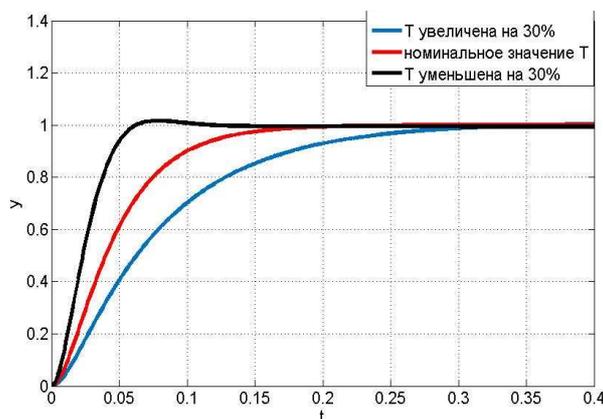


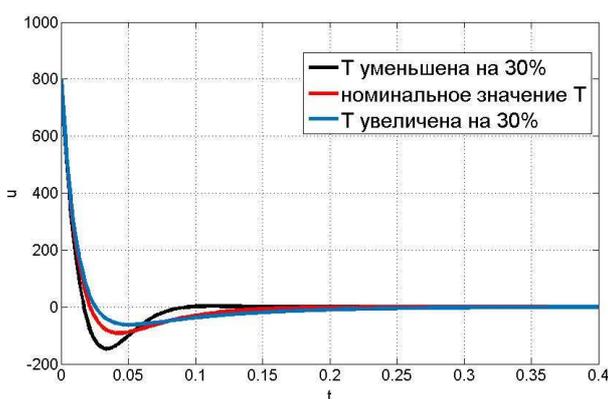
Рис.3. Управляющее воздействие в системе с ПИД-регулятором (частотный метод)

Из *Рис. 2* понятно, что при увеличении  $T$  уменьшается перерегулирование и увеличивается время переходного процесса. На *Рис. 3* можно заметить, что ресурс управления при изменении  $T$  остается постоянным, но колебательность возрастает при уменьшении постоянной времени.

На *рис. 4* и *5* представлены аналогичные графики для системы с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны спектральным методом.



*Рис.4.* Влияние постоянной времени в системе с ПИД-регулятором (спектральный метод)



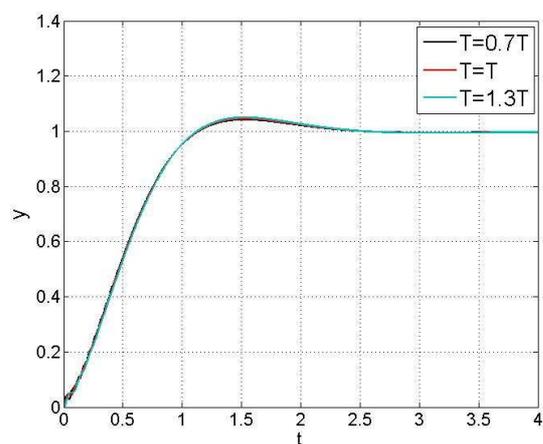
*Рис.5.* Управляющее воздействие в системе с ПИД-регулятором (спектральный метод)

В этом случае влияние изменения постоянной времени объекта управления аналогично предыдущему случаю, однако требуется меньший ресурс управляющего воздействия.

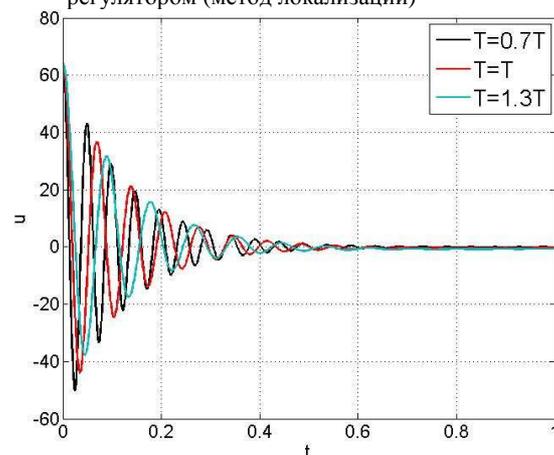
Аналогичные графики для системы с регулятором, рассчитанным методом локализации, представлены на *Рис. 6* и *7*.

Как видно, в данной системе изменения параметров объекта практически не влияют на качество переходного процесса. Отработка нестационарных параметров происходит в начальный момент времени и значительно лучше, чем в системе с ПИД-регулятором.

Видно (*Рис. 7*), что при изменении постоянной времени объекта управляющее воздействие не претерпевает качественного изменения, при этом ресурс управления остается постоянным.



*Рис.6.* Влияние постоянной времени в системе с регулятором (метод локализации)



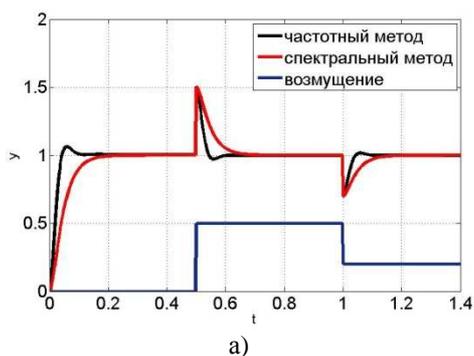
*Рис.7.* Управляющее воздействие в системе с регулятором (метод локализации)

Графики изменения переходного процесса и управляющего воздействия при действии на выход системы возмущения в виде ступенчатого воздействия показаны на *Рис. 8* и *9*.

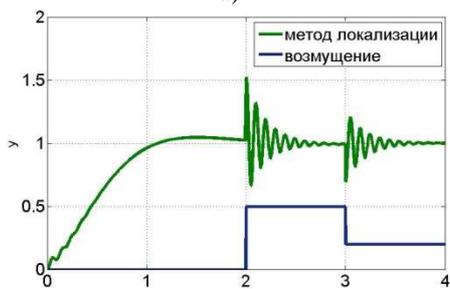
Как видно по *Рис. 8а* и *Рис. 8б*, в момент подачи возмущающего воздействия в системах со всеми регуляторами возникает «бросок», который обрабатывается за доли секунды. Можно заметить, что система с ПИД-регулятором, рассчитанным частотным методом, обрабатывает «бросок» на порядок быстрее. При этом во всех случаях превышает допустимое перерегулирование.

Наибольший «бросок» управления при действии возмущений возникает в системе с регулятором, рассчитанным методом локализации (*Рис. 9 б*). Наименьший «бросок» - в системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны спектральным методом (*Рис. 9 а*).

Изменение выходной переменной и управляющего воздействия при действии ступенчатого возмущения на вход объекта показано на *Рис. 10* и *11*.

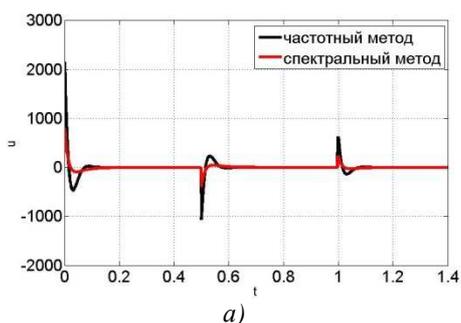


а)

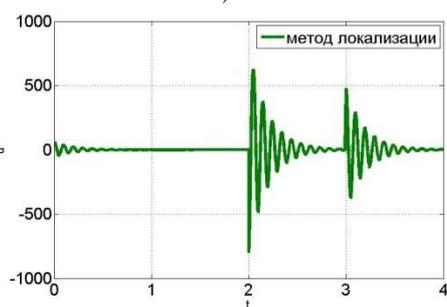


б)

Рис.8. Графики переходного процесса в системах с различными регуляторами при действии на выходе системы возмущения



а)



б)

Рис.9. График изменения управляющего воздействия в системах с регуляторами при действии на выходе системы возмущения

Лучше всего с возмущением на входе система справляется система с регулятором, рассчитанным методом локализации (Рис. 10). Системы с ПИД-регуляторами не справляются с возмущающим воздействием, действующим на вход системы. На Рис. 11 видно, что наибольшее управление требуется системе с ПИД-регулятором, коэффициенты которого рассчитаны частотным методом. Наименьшее управление – системе с регулятором, рассчитанным методом локализации.

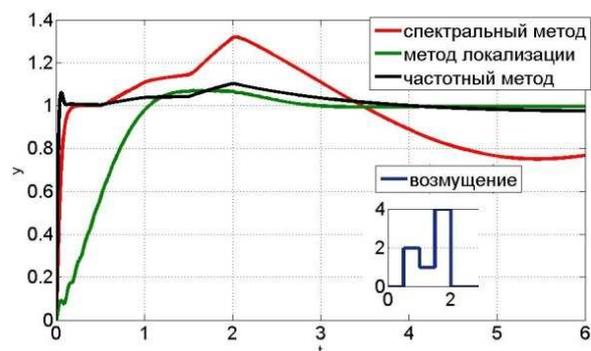


Рис.10. Графики переходного процесса в системах с регуляторами при действии на входе системы возмущения

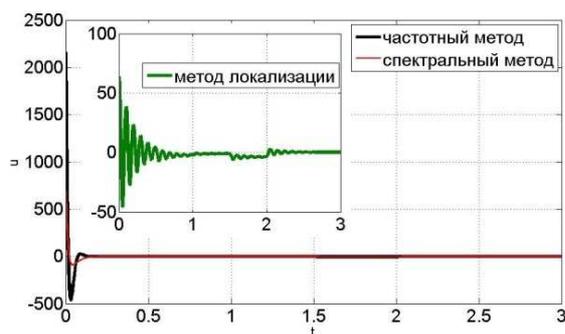


Рис.11. График изменения управляющего воздействия в системах с регуляторами при действии на входе системы возмущения

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведённого исследования можно дать следующие рекомендации к выбору регулятора: если объект содержит нестационарные параметры или его свойства не полностью известны, то лучше использовать для расчета параметров регулятора метод локализации. При этом требуемое управляющее воздействие у такого регулятора в несколько раз меньше, нежели у ПИД-регулятора.

Поскольку при известных параметрах объекта переходный процесс в системе с ПИД-регулятором обладает требуемым качеством, то в этом случае имеет смысл выбрать его как более простой тип регулятора. Сравнивая между собой ПИД-регуляторы, рассчитанные частотным и спектральным методами, можно сказать, что при использовании спектрального подхода процессы в системе не имеют перерегулирования, в отличие от частотного. Однако с возмущениями ПИД-регулятор на основе спектрального метода справляется хуже и требует большего ресурса управления.

Сравнивая метод локализации с ПИД-регулятором, отметим, что у каждого есть свои преимущества и недостатки и своя область применения. Поэтому в зависимости от конкретной задачи нужно выбирать тот или иной регулятор.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию № 2014/138, тема

проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности»

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Метод Зиглера-Николса. - URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_method) Дата обращения: 3.03.15.
- [2] Энциклопедия АСУ ТП. - URL: <http://www.bookasutp.ru/> Дата обращения: 31.03.15.
- [3] Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. - Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. - 631 с.
- [4] ПИД-регулирование (ПИД-регулятор) на практических примерах. - URL: <http://pidcontrollers.narod.ru/> Дата обращения: 31.03.15
- [5] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования. - М.: Высшая школа, 2006. - 365 с.
- [6] Востриков А.С., Уткин В.И., Французова Г.А. Системы с производной вектора состояния в управлении // Автоматика и телемеханика. - 1982. - № 3. - С. 22-25.
- [7] Филипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью - М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. - 616 с.
- [8] Дорф Р., Бишоп Р. Современные системы управления. - М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. - 832 с.
- [9] Жмудь В.А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. - Новосибирск: НГТУ, 2012. - 335 с.
- [10] Заворин А.Н., Новицкий С.П., Жмудь В.А., Ядрышников О.Д., Поллер Б.В. Синтез робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации // Научный вестник НГТУ. - 2012. - № 2. - С. 196-200.
- [11] Воевода А.А., Жмудь В.А., Заворин А.Н., Ядрышников О.Д. Сравнительный анализ методов оптимизации регуляторов с использованием программных средств VisSim и MatLab // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2012. - № 9. - С. 37-43.



**Французова Галина Александровна** – д.т.н., профессор кафедры автоматки. Область научных интересов: методы анализа и синтеза нелинейных систем управления с нестационарными параметрами.  
E-mail: [Frants@ac.cs.nstu.ru](mailto:Frants@ac.cs.nstu.ru)



**Толстоконова Екатерина Павловна** – студентка факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теория автоматического управления, синтез регуляторов.  
E-mail: [sulfokamfokain@mail.ru](mailto:sulfokamfokain@mail.ru)



**Шилкова Наталья Юрьевна** – студентка факультета автоматки и вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: теория автоматического управления, синтез регуляторов.  
E-mail: [ya\\_komar@mail.ru](mailto:ya_komar@mail.ru)

## Comparative Analysis of the Capabilities of Typical Regulators with Regulators by Localization Method

G.A. FRANTSUZOVA, E.P. TOLSTOKONEVA,  
N.Y. SHILKOVA

*Abstract:* Comparative analysis of the capabilities of systems with PID-regulator and regulator on the basis of localization method are offered in this paper. PID-regulator coefficients were obtained by means of the frequency and spectrum methods. Results of the study of processes in the system with different regulators under the influence of various external perturbations and time-dependent parameters of the object are presented.

*Key words:* automatic, PID-regulator, localization method, differentiating filter, time-dependent parameters, external perturbation.

## REFERENCES

- [1] Metod Ziglera-Nikolsa. - URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols\\_method](http://en.wikipedia.org/wiki/Ziegler%E2%80%93Nichols_method) Data obrashheniya: 3.03.15.
- [2] Jenciklopedija ASU TP. - URL: <http://www.bookasutp.ru/> Data obrashheniya: 31.03.15.
- [3] Nikulin E.A. Osnovy teorii avtomaticheskogo upravlenija. - Sankt-Peterburg: BHV-Peterburg, 2004. - 631 s.
- [4] PID-regulirovanie (PID-reguljator) na prakticheskikh primerah. - URL: <http://pidcontrollers.narod.ru/> Data obrashheniya: 31.03.15
- [5] Vostrikov A.S., Frantsuzova G.A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. - M.: Vysshaja shkola, 2006. - 365 s.
- [6] Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. Sistemy s proizvodnoj vektora sostojanija v upravlenii // Avtomatika i telemehaniка. - 1982. - № 3. - S. 22-25.
- [7] Filips Ch., Harbor R. Sistemy upravlenija s obratnoj svjaz'ju - M.: Laboratorija bazovyh znaniy, 2001. - 616 s.
- [8] Dorf R., Bishop R. Sovremennye sistemy upravlenija. - M.: Laboratorija bazovyh znaniy, 2002. - 832 s.
- [9] Zhmud V.A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija. - Novosibirsk: NGTU, 2012. - 335 s.
- [10] Zavorin A.N., Novickij S.P., Zhmud V.A., Jadrishnikov O.D., Poller B.V. Sintez robastnogo reguljatora metodom dvojnnoj iterativnoj parallel'noj chislennoj optimizacii // Nauchnyj vestnik NGTU. - 2012. - № 2. - S. 196-200.
- [11] Voevoda A.A., Zhmud V.A., Zavorin A.N., Jadrishnikov O.D. Sravnitel'nyj analiz metodov optimizacii reguljatorov s ispol'zovaniem programmnyh sredstv VisSim i MatLab // Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. - 2012. - № 9. - S. 37-43.

**II. Робототехника.  
Программные средства и системы.  
Телемеханика и телеметрия.**

## Содержание раздела:

- Зебзеев А.Г. Метод блочной спорадической передачи данных с динамическим установлением апертур телеизмерений в системах телемеханики. ФГАОУ ВО НИ ТПУ (Томск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 37–44.
- Жмудь В.А., Трубин И.В., Трубин М.В. Обмен данными между компьютером и микроконтроллером STM32F100 по последовательному интерфейсу связи RS-232. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 45–51.
- Агапов Е.В., Никулин В.С. Модернизация модели робота-пылесоса. ФГБОУ ВПО «НГТУ», Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 52–54.

# Метод блочной спорадической передачи данных с динамическим установлением апертур телеизмерений в системах телемеханики

А.Г. Зебзеев  
ФГАОУ ВО НИ ТПУ, Томск, Россия

**Аннотация:** в статье приведено сравнение циклической и спорадической передачи телеизмерений технологических параметров в системах телемеханики. Указаны преимущества спорадического способа. Для повышения эффективности передачи данных в различных условиях протекания технологического процесса и состояний линий связи предложено применение блочной спорадической передачи данных с динамическим установлением апертур двух уровней. Для установления апертур в режиме реального времени использован алгоритм Мамдани.

**Ключевые слова:** апертура, блочная спорадическая передача данных, алгоритм Мамдани

## ВВЕДЕНИЕ

Для распределенных объектов характерна большая (более 1 км) удаленность отдельных объектов между собой и от центра сбора и обработки информации. Автоматизация распределенных объектов накладывает требования к составу технических средств и функциональным характеристикам автоматизированной системы управления (АСУ). Низкая скорость передачи данных отрицательно влияет на быстродействие системы, а развертывание высокоскоростной связи сопряжено с большими временными и денежными затратами [1]. Поэтому для распределенных технологических объектов характерно применение систем телемеханики (СТМ). Телемеханика – важнейшая подсистема АСУ, охватывающей программно-технические средства контроля и управления объектами на расстоянии с применением специализированных преобразований сигналов для эффективного использования каналов связи [2]. Известно, что распределенные системы критичны к тому, как построен опрос контроллеров [3]. Например, стандартным режимом опроса на объектах ОАО «НК «Роснефть» является циклический способ. При таком режиме происходят значительные

задержки передачи информации и выдачи управляющих воздействий. Типовая структура передачи данных с распределенных объектов с использованием радиосвязи приведена на Рис. 1.

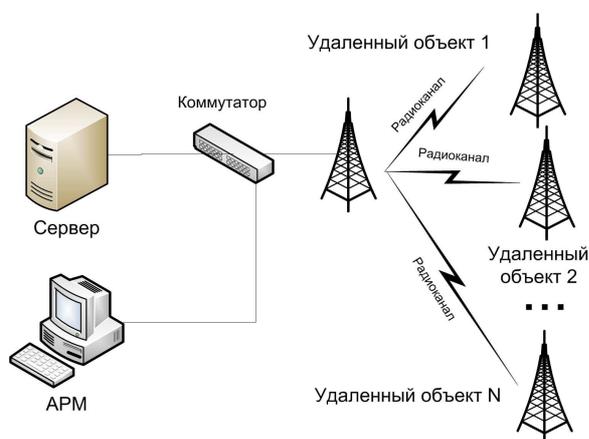


Рис. 1. Типовая структура передачи данных с распределенных объектов с использованием радиосвязи

При этом увеличение скорости передачи данных и выбор соответствующего оборудования связи не всегда являются достаточными для выполнения требований по необходимому быстродействию системы [4]. Критичным может оказаться также время обработки запросов контроллерным оборудованием при большом количестве удаленных объектов, опрашиваемых поочередно. Для решения данной проблемы и более эффективного использования каналов связи предлагается использование одного из режимов работы системы телемеханики – спорадического.

## 1. БЛОЧНАЯ СПОРАДИЧЕСКАЯ ПЕРЕДАЧА ДАННЫХ

В таком режиме контроллеру удаленного объекта не надо дожидаться разрешения на передачу данных от сервера: он может самостоятельно инициировать передачу данных в случае необходимости. Однако при большой (и тем более лавинной) загрузке каналов связи режим спорадической передачи данных может

характеризоваться большими задержками из-за коллизий без гарантии времени доставки информации. Поэтому для минимизации рисков перегрузки каналов связи необходим тщательный и полный расчет необходимых характеристик оборудования при проектировании СТМ с моделированием реальной динамики процессов системы. Спорадический режим характерен тем, что для каждого контролируемого сигнала телеизмерения устанавливается порог чувствительности к изменениям значения его величины относительно предыдущего замера – апертура ( $\Delta$ ). На Рис. 2 графически раскрывается физический смысл апертуры в виде разницы между горизонтальными линиями, при пересечении которых (не более одного раза подряд) значением контролируемого параметра (уровня жидкости дренажной емкости  $L_{де}$ ) происходит передача текущего значения в диспетчерский пункт.

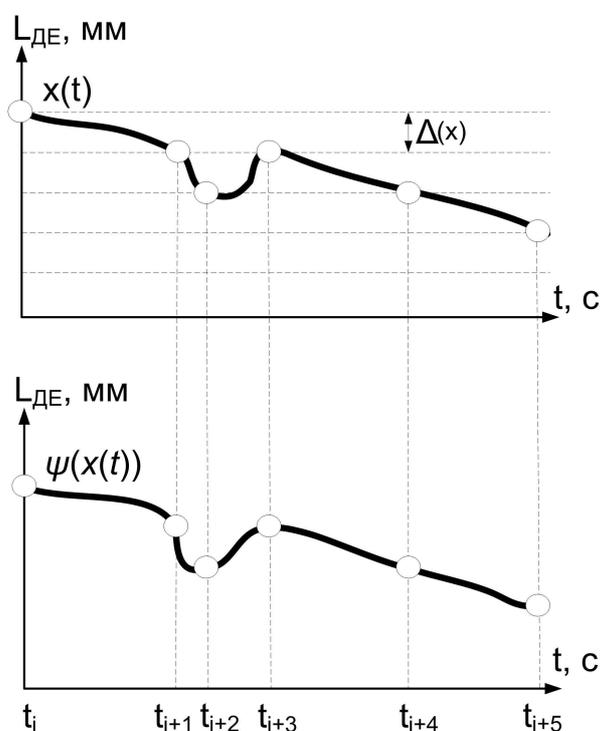


Рис. 2. Отображение динамики технологического параметра в диспетчерском пункте при спорадическом способе передачи данных

Помимо абсолютных значений апертуры, показанной в примере, возможны также относительные значения.

На Рис. 3 показано отображение динамики изменения уровня  $L_{де}$  в диспетчерском пункте при циклическом способе передачи данных. Циклический режим характеризуется периодическим опросом значений данных через определенные промежутки времени  $\tau_{опроса}$ . Периодичность опроса согласно [5] может устанавливаться от секунд до нескольких минут. Преимуществом данного метода является простота реализации алгоритма опроса. Однако

при большом значении  $\tau_{опроса}$  точность отображения динамики контролируемого параметра в диспетчерском пункте будет крайне низкой. Отображение  $\psi(x_i(t))$  контролируемого параметра  $x_i(t)$  может значительно отличаться от значений реального процесса (см. интервал  $t_{i+2} - t_{i+3}$  Рис. 3). При спорадической передаче данных, направленной на снижение передаваемого трафика и повышение быстродействия системы, отображение  $\psi(x_i(t))$  является более точным, что позволяет повысить наблюдаемость системы (Рис. 2). Повышение быстродействия при использовании спорадической передачи данных напрямую зависит от характера протекания технологического процесса. Как правило, технологические процессы нефтегазодобычи характеризуются медленно-изменяющимися параметрами без резких колебаний. Поэтому относительное количество интервалов, аналогичных  $t_{i+2} - t_{i+3}$  (Рис. 2–3) несущественно. В приведенном примере отсутствие резких колебаний процесса приводит к сокращению трафика почти в 2 раза.

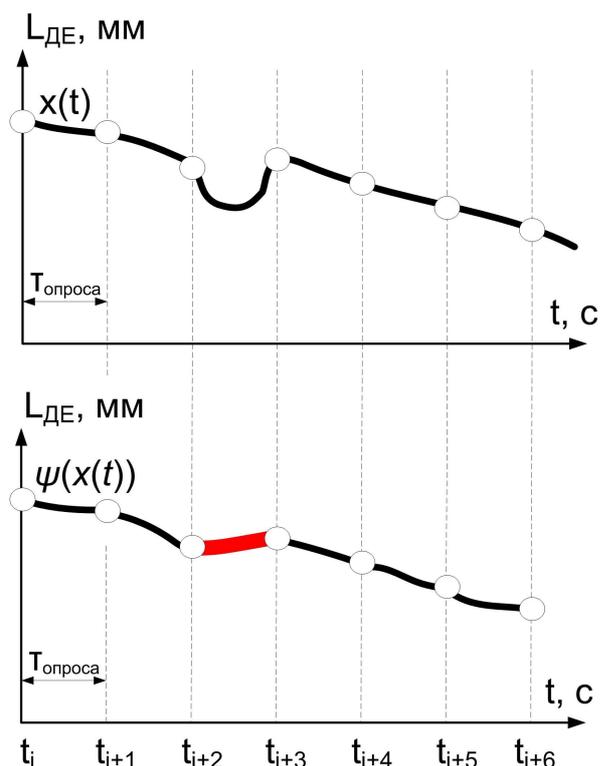


Рис. 3. Отображение динамики технологического параметра в диспетчерском пункте при циклическом способе передачи данных

## 2. УСТАНОВЛЕНИЕ ЗНАЧЕНИЙ АПЕРТУР ТЕЛЕИЗМЕРЕНИЙ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

На данный момент не существует единого подхода к определению величины апертуры телеизмерений. При установлении апертуры

должны приниматься во внимание расчетные возможности каналов связи с одной стороны и требования к точности передачи данных с другой. Сложность определения подходящего значения апертуры определяется изменением характеристик каналов связи из-за различных помех, а также непредсказуемостью протекания технологического процесса. Для решения этой проблемы автором предлагается динамическое установление значения апертур телеизмерений в зависимости от внешних условий.

В качестве параметров, влияющих на установление значения апертуры, предлагается учитывать приведенные далее.

1. Точность визуализации параметра телеизмерения на видеокадре диспетчера  $s_B(x_i)$ ;
2. Точность сохранения параметра телеизмерения в базе данных  $s_{\delta_d}(x_i)$ ;
3. погрешность средства измерения  $\delta(x_i)$ ;
4. Близость текущего значения параметра телеизмерения к критическому значению;
5. Скорость изменения текущего значения параметра телеизмерения;
6. Наступление «связанного» с телеизмерением события;
7. Текущая пропускная способность и загруженность канала связи;
8. Средняя пропускная способность и загруженность всех каналов связи СТМ;
9. Общая динамика технологических процессов на всех контролируемых объектах;
10. Наличие узлов ретрансляции трафика.

Разные значения  $s_B(x_i)$  и  $s_{\delta_d}(x_i)$ , а также использование метки времени при формировании блока данных определяют возможность использования блочной спорадической передачи данных, описываемой в [6]. Данный способ предписывает ожидание получения (накопление) дополнительных спорадических данных и передачу их единым блоком данных для повышения эффективности передачи. При этом предполагается ожидание данных в течение установленного времени. Автором данной работы предлагается для реализации блочной спорадической передачи данных введение понятий двух уровней апертуры.

*Апертурой первого уровня*  $\Delta_1(x_i)$  измеряемого параметра  $x_i(t)$  называется абсолютное или относительное значение порога чувствительности параметра  $x_i(t)$  к изменениям значения его текущей величины  $x_i(t_{\text{тек}})$  относительно последнего отправленного значения  $x_i(t_0)$ ,  $t_{\text{тек}} > t_0$ , при достижении которого необходима спорадическая передача  $x_i(t_{\text{тек}})$  на диспетчерский уровень без возможности отложенной отправки (т.е. при  $t > t_{\text{тек}}$ ), причем  $s_B(x_i) \leq \Delta_1(x_i) \leq \delta(x_i)$ .

*Апертурой второго уровня*  $\Delta_2(x_i)$  измеряемого параметра  $x_i(t)$  называется абсолютное или относительное значение порога чувствительности параметра  $x_i(t)$  к изменениям значения его текущей величины  $x_i(t_{\text{тек}})$  относительно последнего из значений: отправленного значения  $x_i(t_0)$  или добавленного в блок данных с возможностью отложенной отправки  $x_i(t_0)$ ,  $t_{\text{тек}} > \max(t_0, t_0)$ , при достижении которого необходимо добавление  $x_i(t_{\text{тек}})$  в блок данных с возможностью отложенной отправки (т.е. при  $t > t_{\text{тек}}$ ), причем  $s_{\delta_d}(x_i) \leq \Delta_2(x_i) < \delta(x_i)$ .

Очевидно, что определение требуемых значений апертур в условиях многокритериального и конфликтного поведения системы с большим количеством параметров телеизмерений (порядка 100), а также с различными непредсказуемыми течениями технологических процессов и состояниями работы оборудования требует сложной математической модели. Причем, определение значений апертур должно происходить в режиме реального времени. Для установления апертур телеизмерений при указанных факторах предлагается использование инструментов нечеткой логики [7–9]. Предложенная методология, основанная на нечетком логическом выводе, позволяет избежать чрезмерно большого объема вычислений, а также сформировать описание алгоритма на языке, интуитивно понятном для всех участников разработки системы (технологов, инженеров, менеджеров, программистов и т.д.).

Нечеткая логика многозначна, что позволяет определить промежуточные значения для однозначных оценок: да/нет, истинно/ложно и т.п. Выражения подобные таким, как “немного большая” или “довольно медленно” возможно оценивать математически и вычислять программно. Важнейшим понятием систем нечеткой логики является нечеткое множество. Согласно [9] понятие нечеткого множества – это попытка математической формализации нечеткой информации для построения математических моделей. Составляющие нечеткое множество элементы, имеющие одинаковые характеристики, могут обладать ими в различной мере и, следовательно, относиться к этому множеству с различной степенью. В таком понимании утверждения типа “этот элемент относится к данному множеству” будут недостаточными, поскольку дополнительно необходимо указывать “как сильно”, т.е. в какой степени элемент нечеткого множества удовлетворяет свойствам такого множества.

Существует большое количество методов реализации управления, основанных на нечеткой логике [9]. Автором работы предлагается использование алгоритма нечеткого вывода

Мамдани, который в настоящее время получил, пожалуй, наибольшее практическое применение в задачах нечеткого моделирования.

Данный алгоритм описывает несколько последовательно выполняющихся этапов (Рис. 4).

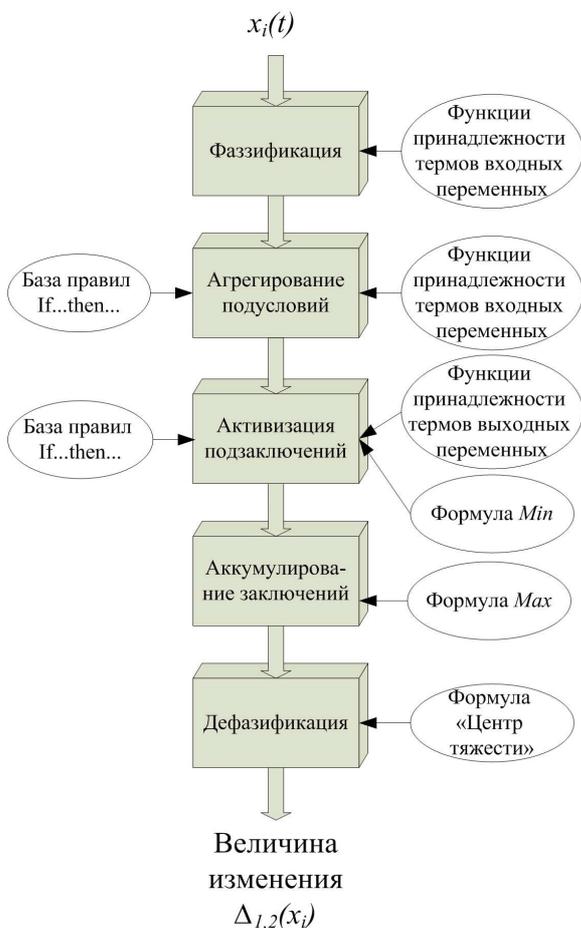


Рис. 4. Этапы формирования нечеткого вывода Мамдани

Далее рассмотрим подробнее каждый из этапов нечеткого вывода Мамдани.

### Фаззификация

Данный этап предполагает преобразование четкого значения входной переменной в нечеткое множество входных лингвистических переменных. *Лингвистической переменной* [9] (*linguistic variable*) называется переменная, значениями которой могут быть слова или словосочетания некоторого естественного или искусственного языка (термы). Каждый терм формализуется нечетким множеством с помощью функции принадлежности. Например, для входной лингвистической переменной *апертура первого уровня телеизмерения уровня жидкости в дренажной емкости*  $\Delta_1(L_{де})$  функция принадлежности ее термов (*маленькая, средняя, большая*) представлена на Рис. 5.

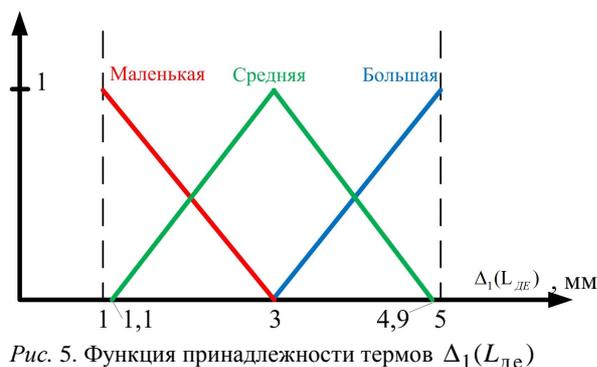


Рис. 5. Функция принадлежности термов  $\Delta_1(L_{де})$

Результатом процедуры фаззификации является формирование массива нечетких значений входных лингвистических переменных.

### Агрегирование подусловий

Начиная с данного этапа используется специально разработанная база правил, т.е. множество правил, где каждому подзаключению сопоставлен определенный весовой коэффициент. При этом лингвистические переменные, присутствующие в условиях, называются *входными*, а в заключениях *выходными*. Условия правил могут быть составными, т.е. включать подусловия, связанные между собой при помощи логической операции “AND”.

Так база правил для установления апертур телеизмерения уровня в дренажной емкости имеет следующий вид:

RULE\_1: IF “Апертура  $\Delta_1(L_{де})$  средняя” ( $F_{i1}$ ) AND “Пропускная способность маленькая” ( $F_{i2}$ ) THEN “Слегка увеличить  $\Delta_1(L_{де})$ ” ( $F_{o1}$ );

...  
 RULE\_n: IF “Апертура  $\Delta_2(L_{де})$  большая” ( $F_{iq-1}$ ) AND “Наступило связанное с  $L_{де}(t)$  событие” ( $F_{iq} = 1$ ) THEN “Уменьшить  $\Delta_2(L_{де})$ ” ( $F_{on}$ ); где  $F_{iz}, F_{oj}$  – весовые коэффициенты, означающие степень уверенности в истинности указанных значений входных и выходных лингвистических переменных соответственно в соответствии с функциями принадлежности их термов, где  $j=1...n, z=1...q$ .

Необходимо обратить внимание, что, например, для случая “Наступило связанное с  $x_i(t)$  событие” можно однозначно определить истинность события. В этом случае весовой коэффициент  $F_{iq}$  будет равен одному из предельных значений “0” или “1”. Условия выбраны таким образом, что управляющие изменения затронут либо значение  $\Delta_1(L_{де})$ , либо значение  $\Delta_2(L_{де})$ .

Целью этого этапа является определение степени истинности условий для каждого правила системы нечеткого вывода. Для каждого условия находим минимальное значение истинности всех его подусловий:  $F_{ij} = \min\{F_{ik}\}$ , где  $j=1...n$ ,

$k=1\dots z$ ,  $z$  – число подусловий, в которых участвует  $j$ -ая входная переменная.

#### Активизация подзаключений

На этом этапе происходит переход от условий к подзаключениям. Для каждого подзаключения в соответствии с функцией принадлежности выходной лингвистической переменной (рис. 6) и результатом предыдущей процедуры находится степень истинности  $F_{Oj} = \Omega(F_{ij})$ ,  $j=1\dots n$ .

На Рис. 6 представлена функция принадлежности термов (уменьшить, слегка уменьшить, слегка увеличить, увеличить) для выходной переменной изменение апертуры первого уровня телеизмерения уровня жидкости в дренажной емкости –  $\mu_i(\Delta_1(L_{де}))$ .

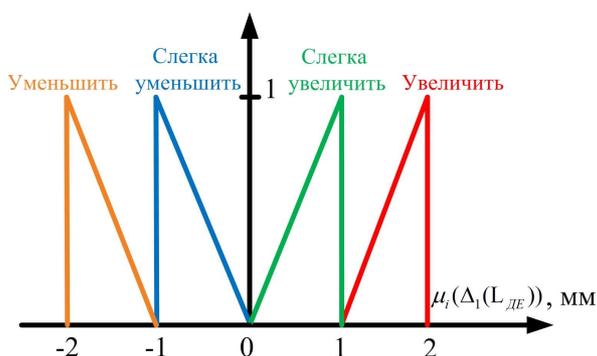


Рис. 6. Функция принадлежности термов  $\mu_i(\Delta_1(L_{де}))$

#### Акумуляция заключений

Целью процедуры является получение нечеткого множества (или их объединения) для каждого из  $n$  подзаключений (выходных переменных)  $\mu_i$  с учетом их весовых коэффициентов  $F_{oi}$ . Объединением нечетких множеств является нечеткое множество со следующей функцией принадлежности:

$$\mu(x) = \mu(\Delta, F_o) = \max\{\mu_1(\Delta, F_{o1}) \dots \mu_n(\Delta, F_{on})\},$$

где  $\mu_i(\Delta, F_{oi})$  – функции принадлежности объединяемых множеств.

#### Дефазификация выходных переменных

Цель дефазификации – получить количественное значение выходной лингвистической переменной. В реализации алгоритма предлагается использование метода центра тяжести, в котором значение выходной переменной рассчитывается по формуле:

$$y = \frac{\int_{Min}^{Max} x \cdot \mu(x) dx}{\int_{Min}^{Max} \mu(x) dx},$$

где:

$\mu(x)$  – функция принадлежности нечеткого множества, полученная на предыдущем этапе;

$Min$  и  $Max$  – границы универсума нечетких переменных (например, «-2» и «2» для переменной изменение апертуры первого уровня телеизмерения уровня жидкости в дренажной емкости);

$y$  – результат дефазификации.

### 3. АЛГОРИТМ ФОРМИРОВАНИЯ БЛОКА ДАННЫХ ПРИКЛАДНОГО УРОВНЯ

На основании установленных в реальном режиме времени апертур формируется блок данных прикладного уровня для отправки на диспетчерский уровень для архивирования и визуализации параметров. Блоки данных прикладного уровня (ASDU – application service data units) формируются на прикладном уровне в соответствии со стандартизованными структурами в зависимости от выбранного протокола, передаются на транспортный уровень (как правило, TCP) для добавления соответствующего заголовка, организации гарантированной отправки или сразу на канальный уровень для кодирования в соответствующем протоколе.

В зависимости от наличия транспортного протокола эффективная длина ASDU может отличаться. Это обусловлено тем, что применение транспортного протокола дополнительно увеличивает формирующийся пакет данных лишним заголовком, что определяет целесообразность формирования более длинного “сообщения”. Как известно [10], длина пакета данных существенно влияет на эффективную пропускную способность сети. Так, при номинальной пропускной способности RadioEthernet 10 Мб/с, биты будут передаваться за 0,1 мкс. Согласно расчетам, при увеличении размера пакета с 46 до 1500 байт эффективная пропускная способность протокола существенно, почти в 2 раза, увеличивается – с 5,48 Мб/с до 9,75 Мб/с. Аналогичный рост характерен для всех протоколов, и это говорит о том, что размер пакета – один из тех параметров, которые в наибольшей степени влияют на производительность сети. Максимальная длина ASDU протокола ГОСТ Р МЭК 870-5-104:  $Mlength = 249$  байт, максимальная длина данных фрейма (протокол DNP3 оперирует указанным понятием) DNP3:  $Mlength = 250$  байт. Однако в условиях высоких помех оборудование связи уменьшает максимальную длину пакетов данных (maximum transmission unit – MTU), что может дополнительно ограничить максимальную длину размера ASDU. Данное ограничение необходимо учитывать в алгоритме подготовки ASDU.

#### Алгоритм подготовки ASDU.

**Шаг. 1.** Вычислить значения  $|x_i(t_{тек}) - x_i(t_0)|$  для всех  $i = 1\dots k$ , где  $k$  – общее количество всех

телеизмерений, контролируемых контроллером объекта телемеханики.

If  $\exists x_i(t_{\text{тек}})$ , для которых справедливо

$$|x_i(t_{\text{тек}}) - x_i(t_0)| \geq \Delta_1(x_i), \quad (1)$$

то  $X^1 := X'^1 = X^1 \cup x_i(t_{\text{тек}})$  – добавить  $x_i(t_{\text{тек}})$  в множество  $X^1 = \{x_i(t_{\text{тек}})\}$ , где  $|X^1| = h$ ,  $|X^1|$  – мощность множества величин  $X^1 = \{x_i(t_{\text{тек}})\}$ , для которых  $x_i(t_{\text{тек}})$  удовлетворяет (1).

If  $|X^1| = h = 0$ , то перейти на шаг 5.

**Шаг. 2.** If  $\forall x_i(t) \in X^1, i = \{1 \dots h\}, \exists x_j(t)[x_i(t)]$ ,

такое что  $x_j(t)[x_i(t)]X^1 = \emptyset$ , то

$X^1 := X^1 \cup x_j(t)[x_i(t)]$  – добавить в множество  $X^1$  величину  $x_j(t)[x_i(t)]$ .

**Шаг. 3.**  $\forall x_i(t) \in X^1, i = \{1 \dots h\}$  выполнить:

$ASDU_j := ASDU^j = ASDU_j \cup x_i(t_{\text{тек}})$  –

добавить  $x_i(t_{\text{тек}})$  в текущий  $ASDU_j$  с меткой времени  $t_{\text{тек}}$  и проверить соотношение:

$$length(ASDU_j) + length(x_i(t_{\text{тек}})) > MTU, \quad (2)$$

где  $length(ASDU_j)$  – длина текущего  $ASDU_j$  (байт);  $length(x_i(t_{\text{тек}}))$  – типовая длина значения  $x_i(t_{\text{тек}})$  с учетом всех дополнительных атрибутов (метка времени, уникальный адрес объекта информации – тэг и т.д.). В случае выполнения (*true*) неравенства (2) закончить формирование текущего  $ASDU_j$  и отправить его спорадически, предусмотреть формирование для последующих телеизмерений новый  $ASDU_{j+1}$ . В противном случае (*false*), продолжить далее.

**Шаг. 4.** If  $ASDU_j = \emptyset$ , то перейти на шаг 6, в противном случае закончить формирование текущего  $ASDU_j$  и отправить его спорадически, предусмотреть формирование для последующих телеизмерений новый  $ASDU_{j+1}$ , перейти на шаг 6.

**Шаг. 5.** Если произошло событие с формированием  $ASDU$  для спорадической отправки телесигнализации, ответа на команды телеуправления, подтверждения получения уставки, параметра или команды опроса объекта, то завершить блочное формирование текущего  $ASDU_j$  с телеизмерением и отправить спорадически для включения всех сформированных  $ASDU$  в одно сообщение. Предусмотреть формирование для последующих телеизмерений новый  $ASDU_{j+1}$ .

**Шаг. 6.** Вычислить  $|x_i(t_{\text{тек}}) - x_i(\text{Max}(t_0, t_6))|$  для всех  $i = 1 \dots k$ .

If  $\exists x_i(t_{\text{тек}})$ , для которых справедливо:

$$\Delta_2(x_i) < \Delta_1(x_i), \quad (3)$$

$$|x_i(t_{\text{тек}}) - x_i(\text{Max}(t_0, t_6))| \geq \Delta_2(x_i), \quad (4)$$

то  $X^2 := X'^2 = X^2 \cup x_j(t)[x_i(t)]$  – добавить в множество  $X^2$  величину, где  $|X^2| = g$ ,  $X^2 = \{x_i(t_{\text{тек}})\}$  – множество величин, для которых  $x_i(t_{\text{тек}})$  удовлетворяет (3), (4).

If  $|X^2| = g = 0$ , то закончить выполнение алгоритма.

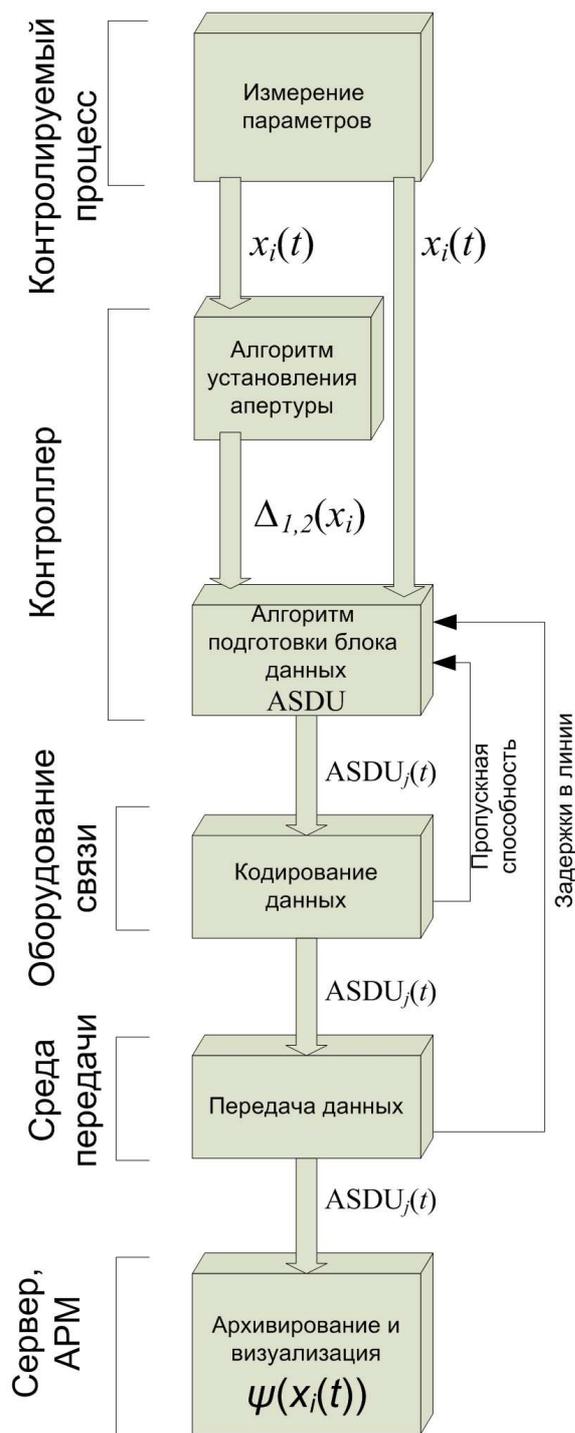


Рис. 7. Процесс спорадической передачи данных телеизмерений

**Шаг. 7.** If  $\forall x_i(t) \in X^2, i = \{1 \dots g\}, \exists x_j(t)[x_i(t)]$ ,  
такое что  $x_j(t)[x_i(t)] \cap X^2 = \emptyset$ , то  
 $X^2 := X'^2 = X^2 \cup x_j(t)[x_i(t)]$  – добавить в  
множество  $X^2$  величину  $x_j(t)[x_i(t)]$ .

**Шаг. 8.**  $\forall x_i(t) \in X^2, i = \{1 \dots g\}$  выполнить:  
 $ASDU_j := ASDU_j \cup x_i(t_{тек})$  –  
добавить  $x_i(t_{тек})$  в текущий  $ASDU_j$  с меткой  
времени  $t_{тек}$  и проверить (2). В случае  
выполнения (*true*) (2) закончить формирование  
текущего  $ASDU_j$  и отправить его спорадически,  
предусмотреть формирование для значений  
последующих телеизмерений новый  $ASDU_{j+1}$ . В  
противном случае (*false*), продолжить далее.

Закончить выполнение алгоритма.

Структура процесса спорадической передачи  
данных представлена на *Рис. 7*.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена процедура блочной  
спорадической передачи данных с динамическим  
установлением апертур телеизмерений. Для этого  
впервые введено понятие апертур двух уровней и  
определены параметры, влияющие на их  
значения. На основании измерения указанных  
параметров было предложено использование  
алгоритма Мамдани для вычисления значений  
апертур с реализацией специально  
разработанного алгоритма формирования блока  
данных прикладного уровня. Эффективность  
рассмотренного метода определяется динамикой  
технологических процессов. Так для медленно  
изменяющихся во времени технологических  
процессов нефтегазодобычи применение  
спорадической передачи данных позволяет в  
несколько раз сократить объем передаваемого  
трафика по каналам связи, увеличить  
быстродействие системы и повысить точность  
наблюдаемости технологического процесса.  
Разработанный алгоритм формирования блока  
был реализован в среде *Matlab*. Проведенные  
исследования показали высокую эффективность  
алгоритма.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Промышленные программно-аппаратные средства на отечественном рынке АСУ ТП: Практическое пособие для специалистов, занимающихся разработкой и модернизацией СУ на промышленных предприятиях. М.: Научтехлитиздат, 2001. 402 с.
- [2] ГОСТ 26.005-82. Телемеханика. Термины и определения (с Изменением N 1)// Москва. Стандартинформ. 2005. 10 с.
- [3] Дудников В., Газизов М., Набиев Д., Нугманов Т. Управление объектами нефтяного месторождения с использованием комбинированных каналов связи // Современные технологии автоматизации. 2000. №2. С.18-27.

- [4] Журавлев Д.В., Зибзеев А.Г. Оптимизация сетевых трафиков распределенных систем управления с использованием генетических алгоритмов. Сборник трудов IX Всероссийской научно-практической конференции «Технологии Microsoft в теории и практике программирования», — Томск: Изд-во ТПУ, 2012. — [С. 49-51]. Режим доступа: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20314361>
- [5] Стандарт Компании ОАО «НК «Роснефть» № ПЗ-04 СД-0038 «Автоматизированные системы управления технологическими процессами нефтегазодобычи. Требования к функциональным характеристикам», версия 2 (введен в действие с 25.07.2014 г.)
- [6] ГОСТ Р МЭК 870-6-1-98 «Устройства и системы телемеханики. Часть 6. Протоколы телемеханики, совместимые со стандартами ИСО и рекомендациями ITC-T. Раздел 1. Среда пользователя и организация стандартов»/ М: Госстандарт России, 1998 – 31 с.
- [7] Zadeh, L.A. Toward a Theory of Fuzzy Systems. Aspect Network and System Theory. - New York: Rinehart and Winston, 1971.
- [8] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH / А. Леоненков. – СПб: БХВ-Петербург, 2003. – 736 с.
- [9] Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB / С. Штовба. – М: Горячая линия–Телеком, 2007. – 288 с.
- [10] Н.А. Олифер, В.Г. Олифер. Средства анализа и оптимизации локальных сетей. Центр Информационных Технологий. 1998 г.



**Зибзеев Алексей Григорьевич** – аспирант кафедры Интегрированных компьютерных систем управления ТПУ, ведущий инженер отдела автоматизации технологических процессов ОАО «ТомскНИПИнефть», автор 18 научных публикаций. Область научных интересов и компетенций – проектирование автоматизированных систем управления и систем связи.  
E-mail: [Zebzeevag@nipineft.tomsk.ru](mailto:Zebzeevag@nipineft.tomsk.ru)

## Method of Blocky Sporadic Data Transfer with the Telemetry Aperture Dynamically Determination in the Remote Control Systems

A.G. ZEBZEEV

**Abstract:** This article contains comparison of cyclical and sporadic transmissions of telemetry for technological characteristics in the remote control systems. Also it includes advantages of the sporadic method. To increase efficacy of data transmission in different conditions for technological process's behavior and telecommunication conditions, it is hereby recommended to use blocky sporadic data transfer with dynamical settings of the two aperture levels on-line. To dynamical settings of apertures on-line it is used Mamdani algorithm.

**Keywords:** aperture, block sporadic data transmission, Mamdani algorithm

REFERENCES

- [1] Promyshlennye programmno-apparatnye sredstva na otechestvennom rynke ASU TP: Prakticheskoe posobie dlja specialistov, zanimajushihsja razrabotkoj i modernizaciej SU na promyshlennyh predpriyatijah. M.: Nauchtehlitizdat, 2001. 402 s.
- [2] GOST 26.005-82. Telemekhanika. Terminy i opredelenija (s Izmenenijem N 1)// Moskva. Standartinform. 2005. 10 s.
- [3] Dudnikov V., Gazizov M., Nabiev D., Nugmanov T. Upravlenie ob#ektami neftjanogo mestorozhdenija s ispol'zovaniem kombinirovannyh kanalov svjazi // Sovremennye tehnologii avtomatizacii. 2000. №2. S.18-27.
- [4] Zhuravlev D.V., Zebzeev A.G. Optimizacija setevyh trafikov raspredelennyh sistem upravlenija s ispol'zovaniem geneticheskikh algoritmov. Sbornik trudov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskoj konferencii «Tehnologii Microsoft v teorii i praktike programirovanija», — Tomsk: Izd-vo TPU, 2012. — [C. 49-51]. Rezhim dostupa: <http://elibrary.ru/item.asp?id=20314361>
- [5] Standart Kompanii OAO «NK «Rosneft'» № P3-04 SD-0038 «Avtomatizirovannye sistemy upravlenija tehnologicheskimi processami neftegazodobychi. Trebovanija k funkcional'nym karakteristikam», versija 2 (vveden v dejstvie s 25.07.2014 g.)
- [6] GOST R MJeK 870-6-1-98 «Ustrojstva i sistemy telemehaniki. Chast' 6. Protokoly telemehaniki, sovmestimye so standartami ISO i rekomendacijami ITU-T. Razdel 1. Sreda pol'zovatelja i organizacija standartov»/ M: Gosstandart Rossii, 1998 – 31 s.
- [7] Zadeh, L.A. Toward a Theory of Fuzzy Systems. Aspect Network and System Theory. - New York: Rinehart and Winston, 1971.
- [8] Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH / A. Leonenkov. – SPb: BHV-Peterburg, 2003. – 736 s.
- [9] Shtovba S.D. Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB / S. Shtovba. – M: Gorjachaja linija–Telekom, 2007. – 288 s.
- [10] N.A. Olifer, V.G. Olifer. Sredstva analiza i optimizacii lokal'nyh setej. Centr Informacionnyh Tehnologij. 1998 g.

# Обмен данными между компьютером и микроконтроллером *STM32F100* по последовательному интерфейсу связи *RS-232*

В.А. Жмудь, И.В. Трубин, М.В. Трубин  
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В современном мире большой объем занимают автоматизированные системы управления, но управление не возможно без связи между устройствами. В настоящее время применяется множество интерфейсов связи, но бесспорно одним из самых простых и популярных является до сих пор *RS-232*. В статье рассматриваются вопросы передачи данных в последовательном виде между микроконтроллером из серии *STM32F100* и компьютером по интерфейсу *RS-232*. Приводится краткая историческая информация по данному интерфейсу. Приводится описание преобразователя *USB/RS232* на базе популярной микросхемы *PL2303*. Подробно рассматривается способ подключения компьютеру. Приводится методика проверки преобразователя без использования других устройств связи. Рассматривается пример программного кода. Раскрываются возможности программы *Terminal*. Для улучшения понимания процесса передачи/приёма данных приводятся осциллограммы сигналов.

**Ключевые слова:** *RS-232, USART, STM32, STM32F100, Terminal, STM32VLDISCOVERY*

## ВВЕДЕНИЕ

В современном мире большой объем занимают автоматизированные системы управления, но управление не возможно без связи между устройствами. Невозможно представить себе систему управления без связи между управляющим устройством и устройством-исполнителем. Целью данной статьи является рассмотрение интерфейса связи между устройствами, а конкретно *RS-232*. В мире применяется множество интерфейсов связи, но бесспорно одним из самых простых и популярных является до сих пор *RS-232*. Данный интерфейс позволяет подключать устройства к большинству ПК, он прост в применении и широко распространен. Одним из ограничивающих факторов применения данного интерфейса является ограничение длины линии

связи - не более 15 м, что объясняется не высокой помехозащищённостью.

## 1. ИНТЕРФЕЙС И СТАНДАРТ *RS-232*

*RS-232 (Recommended Standard 232)* - стандарт, описывающий интерфейс для последовательной двунаправленной передачи данных между терминалом (*DTE, Data Terminal Equipment*) и конечным устройством (*DCE, Data Circuit-Terminating Equipment*). *RS-232* - проводной дуплексный (т.е. можно одновременно передавать и принимать информацию) интерфейс. Информация передается по проводам двоичным сигналом с двумя уровнями напряжения. Логическому «0» соответствует положительное напряжение (от +5 до +15 В), а логической «1» отрицательное (от -5 до -15 В).

В 1962 году *Electronics Industries Association (EIA)* разработало рекомендации для производителей оборудования, назвав их "Рекомендованный стандарт 232".

Интерфейс *RS-232* был разработан максимально универсальным, что позволяло многим производителям легко переделать своё оборудование под этот стандарт. Для электрического согласования линий *RS-232* и стандартной цифровой логики *UART* выпускается большая номенклатура микросхем драйверов. Для передачи "полезных" данных в одной посылке допускалось использовать от 5 до 8 бит. Было предусмотрено 16 сервисных сигналов, использование которых было не обязательно. Допускалась работа как в синхронном, так и асинхронном режиме передачи данных.

В 1969 году *EIA* выпустила редакцию стандарта *RS-232C*, в котором был учтен семилетний опыт применения стандарта *RS-232A/B*. Окончательно был узаконен 25 штырьковый разъем *DB25* и электрические характеристики сигнала. Эта редакция стала основным интерфейсом передачи данных по последовательным каналам связи на многие годы вперед [1].

Таблица 1

Назначение выводов 9 - контактного разъема

Контакт	Сигнал	Направление	Описание
1	CD	Вход	Обнаружена несущая
2	RXD	Вход	Принимаемые данные
3	TXD	Выход	Передаваемые данные
4	DTR	Выход	Хост готов
5	GND	–	Общий провод
6	DSR	Вход	Устройство готово
7	RTS	Выход	Хост готов к передаче
8	CTS	Вход	Устройство готово к приему
9	RI	Вход	Обнаружен вызов

Таблица 2

Назначение выводов 25 - контактного разъема

Контакт	Сигнал	Направление	Описание
1	SHIELD	–	Экран
2	TXD	Выход	Передаваемые данные
3	RXD	Вход	Принимаемые данные
4	RTS	Выход	Хост готов к передаче
5	CTS	Вход	Устройство готово к приему
6	DSR	Вход	Устройство готово
7	GND	–	Общий провод
8	CD	Вход	Обнаружена несущая
9	–	–	Резерв
10	–	–	Резерв
11	–	–	Не используется
12	SCD	Вход	Обнаружена несущая #2
13	SCTS	Вход	Устройство готово к приему #2
14	STXD	Выход	Передаваемые данные #2
15	TRC	Вход	Тактирование передатчика
16	SRXD	Вход	Принимаемые данные #2
17	RCC	Вход	Тактирование приемника
18	LLOOP	Выход	Локальная петля
19	SRTS	Выход	Хост готов к передаче #2
20	DTR	Выход	Хост готов
21	RLOOP	Выход	Внешняя петля
22	RI	Вход	Обнаружен вызов
23	DRD	Вход	Определена скорость данных
24	TRCO	Выход	Тактирование внешнего передатчика
25	TEST	Вход	Тестовый режим

## 2. ОПИСАНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ USB/RS-232 НА БАЗЕ МИКРОСХЕМЫ PL2303

PL2303 - микросхема преобразователя интерфейса USB в RS232. Фотография платы преобразователя USB/RS232 представлена на Рис. 1.



Рис. 1 Внешний платы преобразователя USB/RS232 на базе микросхемы PL2303

Как можно заметить этот модуль имеет два разъема: USB для подключения к персональному компьютеру и 4-х контактную штыревую линейку для связи с устройствами. Контакты штыревой линейки подписаны: «Vcc» - питание +5 В от шины USB персонального компьютера, «RXD» - вход приемника преобразователя, «TXD» - выход передатчика преобразователя и «GND» - нулевой провод источника питания. На плате имеется лишь одна микросхема преобразователя PL2303HX фирмы Prolific Technology. Все подобные преобразователи обычно строятся на таких микросхемах, которые значительно упрощают процедуру преобразования сигналов USB в сигналы RS232. При подключении модуля к компьютеру, и при отсутствии замыканий, на плате загорается красный светодиод, сигнализирующий о наличии питания по шине USB. Для нормальной работы устройства в системе необходимо установить драйвер PL2303HX, дистрибутив которого можно найти на сайте Prolific Technology. Установка драйвера обычно не вызывает трудностей. После установки, в системе должен появиться новый виртуальный COM-порт, наличие которого для операционных систем Windows можно проверить в диспетчере устройств. Подключение преобразователя к отладочной плате можно осуществить при помощи стандартных соединительных проводов.

## 3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММЫ TERMINAL

Для передачи данных от компьютера в микроконтроллер, и для приёма данных от микроконтроллера с последующим отображением результатов на экране монитора будем использовать программу Terminal v1.9 от автора Вг@у++ [3]. Эта программа включает в себя удобный интерфейс по настройке параметров работы COM-порта, а также расширенные возможности по управлению поступающим потоком данных из коммуникационного порта. Внешний вид программы представлен на Рис. 2.

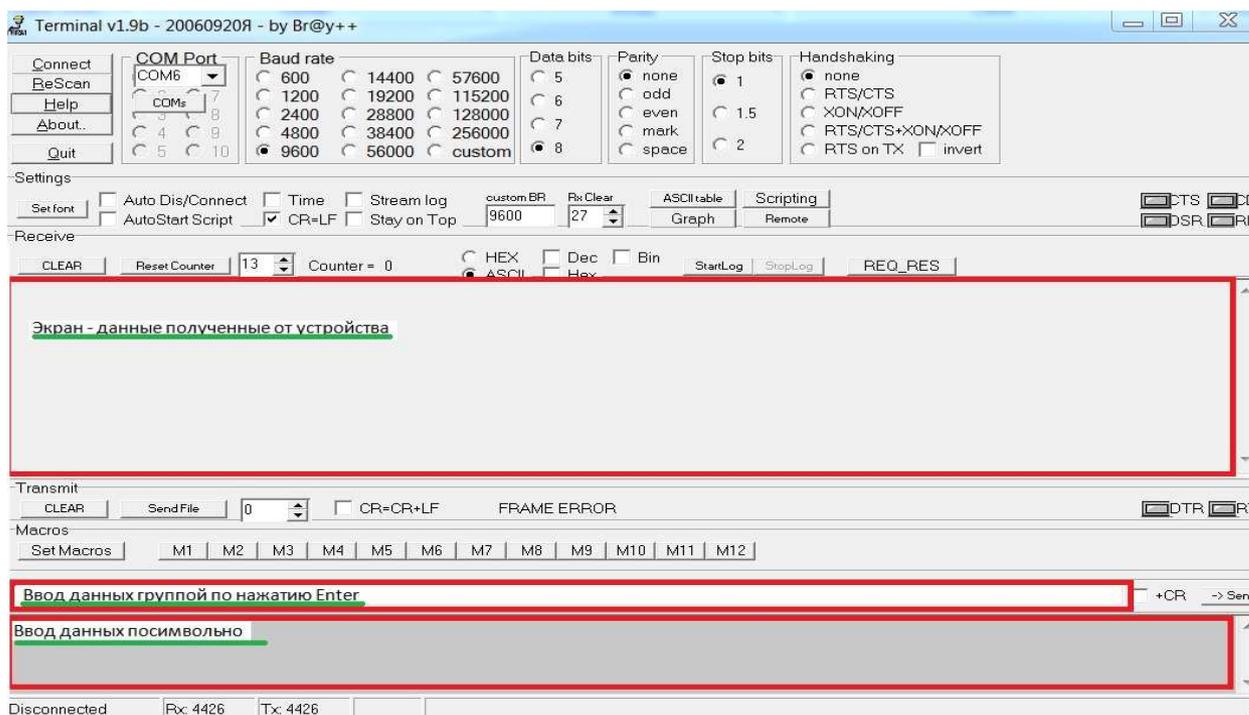


Рис. 2 Внешний вид программы Terminal



Рис. 3 Основные настройки программы Terminal

Программа *Terminal* содержит множество настроек. На Рис. 2 можно увидеть основные настройки для работы с программой:

- выбор COM-порта - при нажатие кнопки ReScan, программа найдет возможные порты для работы, после этого необходимый порт можно выбрать вручную;
- настройка скорости передачи данных - большинство устройств работают со скоростью 9600 бит/с; скорость обмена должна быть выставлена одинаковая на обоих устройствах, которые участвуют в обмене данными.

Количество информационных бит - по умолчанию 8 бит. Контроль четности - отсутствует. Количество стоповых бит - по умолчанию 1 бит. Управление служебными сигналами - отсутствует. Также в программе *Terminal* существует возможность во время

работы вызвать таблицу ASCII кодов кнопкой ASCII table.

#### 4. ПЕРЕДАЧА И ПОЛУЧЕНИЕ ДАННЫХ ЭХО-СИГНАЛА

Используя программу *Terminal* и преобразователь PL2303, передадим данные. Для того, чтобы передать и получить данные не задействовав дополнительные устройства замкнём контакты «RXD» и «TXD» используя джампер и подключим преобразователь к компьютеру как показано на Рис. 4.

Передадим код числа «1». Загружаем программу *Terminal*, в строке ввода данных набираем число «1». На экране вывода информации появляется «1» - см. Рис. 5.



Рис. 4 Подключение преобразователя PL2303 к компьютеру

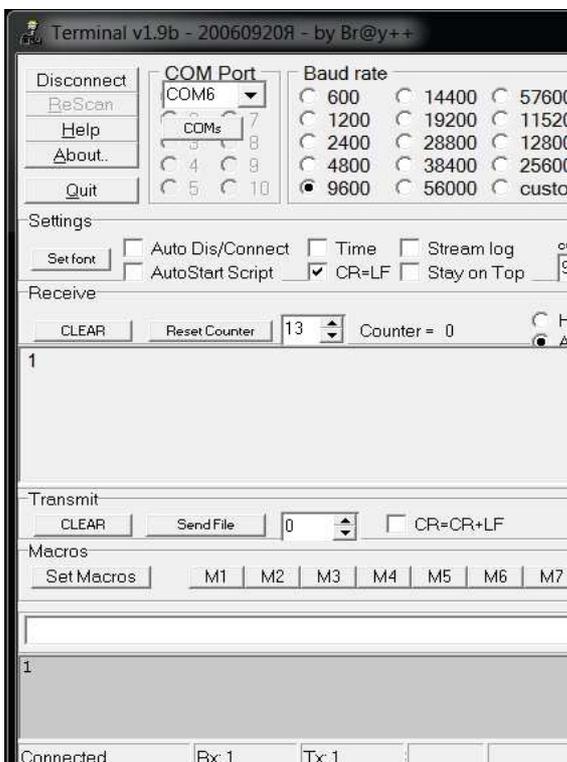


Рис. 5 Передача и получение данных используя программу Terminal



Рис. 6 Осциллограмма сигналов в устройстве

Подключим осциллограф в место соединения сигналов «RXD» - «TXD» и получим следующую осциллограмму - см. Рис. 6.

## 5. ОПИСАНИЕ STM32 USART

Обмен данными - одна из часто возникающих задач. Передача данных осуществляется между датчиком и устройством обработки данных, между управляющим блоком и исполнительным механизмом и т. д.

Существует множество способов передачи информации, но наиболее простым и надежным является передача данных через USART.

Рассмотрим USART модуль в микроконтроллере STM32. Универсальный асинхронный приёмопередатчик (УАПП, англ. *Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, UART*) — узел вычислительных устройств, предназначенный для организации связи с другими цифровыми устройствами, в том числе по RS-232. Преобразует передаваемые данные в последовательный вид так, чтобы было возможно передать их по цифровой линии другому аналогичному устройству. Метод преобразования хорошо стандартизован и широко применялся в компьютерной технике. Представляет собой логическую схему, с одной стороны подключённую к шине вычислительного устройства, а с другой имеющую два или более выводов для внешнего соединения. UART может представлять собой отдельную микросхему (например, Intel I8251, I8250) или являться частью большой интегральной схемы (например, микроконтроллера) [4].

Для работы с модулем USART возьмем отладочную плату STM32VLDISCOVERY и проведем необходимо следующие настройки:

Вначале необходимо настроить параметры порта. Для облегчения работы будем использовать библиотеку производителя микроконтроллера ST Microelectronics. Создаём переменные на основе шаблонов, заполняем поля структур и вызываем функции, которые производят необходимую настройку "железа" - см. Рис. 7, 8.

```

1 //Объявляем переменные на основе шаблонов
2 GPIO_InitTypeDef Init_PORTA;
3 USART_InitTypeDef USART_InitStructure;
4 //Разрешаем подачу тактовых импульсов на подсистемы
5 RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_GPIOA, ENABLE);
6 RCC_APB2PeriphClockCmd(RCC_APB2Periph_USART1, ENABLE);
    
```

Рис. 7. Объявление переменных

Используем простой пример части программы по приёму и передаче символа с кодом на единицу больше, см. Рис. 9.

```

38
39  /*===== USART1 =====*/
40  Init_PORTA.GPIO_Pin = GPIO_Pin_10; // USART1 Rx PA10
41  Init_PORTA.GPIO_Speed = GPIO_Speed_10MHz;
42  Init_PORTA.GPIO_Mode = GPIO_Mode_IPU; // GPIO_Mode_IN_FLOATING; - было
43  GPIO_Init(GPIOA, &Init_PORTA);
44
45  Init_PORTA.GPIO_Pin = GPIO_Pin_9; // USART1 Tx PA9
46  Init_PORTA.GPIO_Speed = GPIO_Speed_10MHz;
47  Init_PORTA.GPIO_Mode = GPIO_Mode_AF_PP; // Alternate function push-pull
48  GPIO_Init(GPIOA, &Init_PORTA);
49
50  USART_InitStructure.USART_BaudRate = 9600;
51  USART_InitStructure.USART_WordLength = USART_WordLength_8b;
52  USART_InitStructure.USART_StopBits = USART_StopBits_1;
53  USART_InitStructure.USART_Parity = USART_Parity_No;
54  USART_InitStructure.USART_HardwareFlowControl = USART_HardwareFlowControl_None;
55  USART_InitStructure.USART_Mode = USART_Mode_Rx | USART_Mode_Tx;
56
57  USART_Init(USART1, &USART_InitStructure);
58
115  USART_Cmd(USART1, ENABLE);

```

Рис. 8 Настройка параметров порта

```

115  USART_Cmd(USART1, ENABLE);

53  /*===== MAIN =====*/
54  int main(void)
55  {
56  static uint8_t ch;
57  #include "maginit.c"
58  //===== MAIN LOOP =====
59  while (1) {
60  while (USART_GetFlagStatus(USART1, USART_FLAG_RXNE) == RESET) {};
61  ch = USART_ReceiveData(USART1); // Принимаем символ
62
63  while (USART_GetFlagStatus(USART1, USART_FLAG_TC) == RESET) {};
64  USART_SendData(USART1, ch+1); // Передаём символ с кодом +1
65  }
66  }
67
68  // КОНЕЦ

```

Рис. 9. Код программы получения и передачи символа с кодом на единицу больше

В данном примере в начале обращаемся к функции «USART\_GetFlagStatus», которая проверяет состояния бита «USART\_FLAG\_RXNE» в «USART1». И если этот бит равен 0, т.е. нет

данных от компьютера, то программа в этом месте закичивается. Как только бит «USART\_FLAG\_RXNE» не будет равен 0, это означает что приняты данные от компьютера.

После этого переменной «ch» присваиваются полученные данные (байт). Далее обращаемся к функции «USART\_GetFlagStatus», которая проверяет состояния бита «USART\_FLAG\_TC» в «USART1». И если этот бит равен 0, т.е. передатчик не готов передавать данные, то программа в этом месте закичивается. Как только бит «USART\_FLAG\_TC» не будет равен 0 - программа передаст данные, которые хранятся в переменной «ch» предварительно добавив к ним число 1.

### СХЕМА СОЕДИНЕНИЯ ПК-USB/RS-232-STM32.

Подключим отладочную плату STM32VLDISCOVERY к преобразователю USB/RS232 по следующей схеме (Рис. 10):

- RX платы к TX преобразователя;
- TX платы к RX преобразователя;
- GND платы к GND преобразователя.

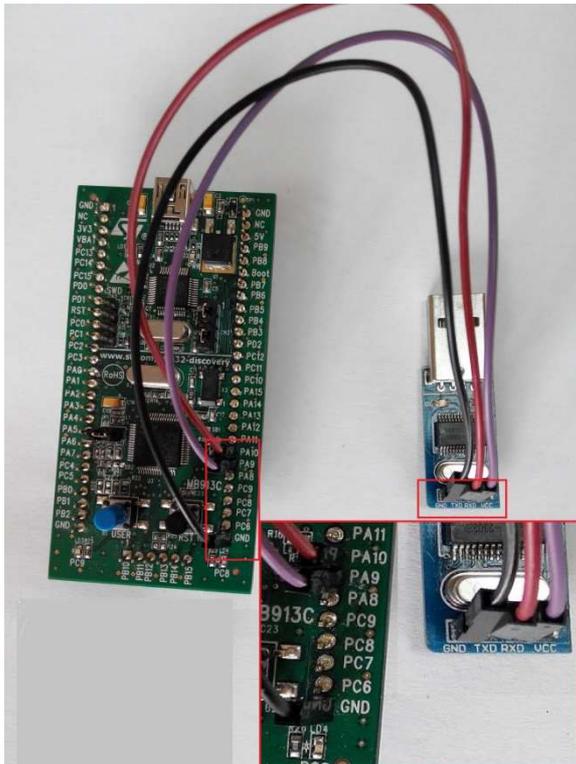


Рис. 10 Подключение STM32VLDISCOVERY к преобразователю USB/RS232

Запишем программу в микроконтроллер и запустим её. На компьютере запустим программу Terminal. В строке ввода данных набираем число «1». На экране вывода информации появляется «2» - см. Рис. 11.

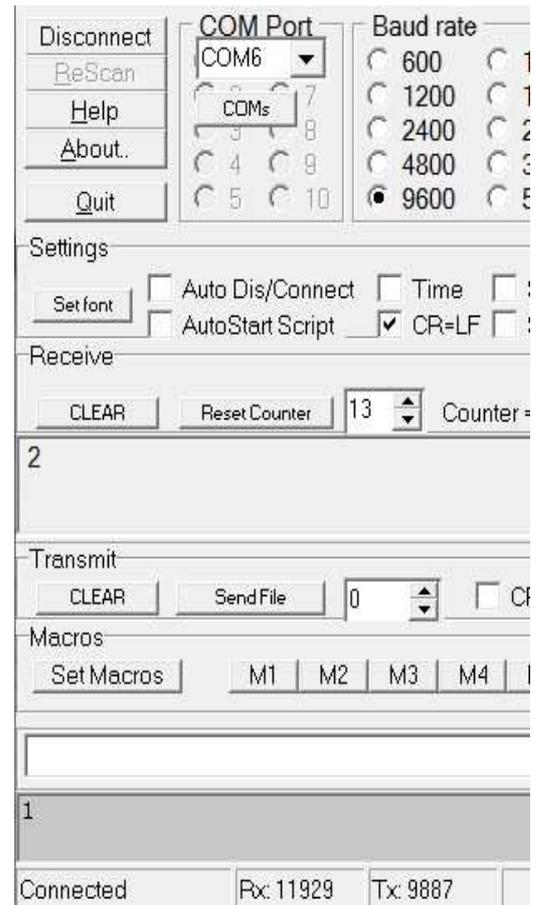


Рис. 11. Получение данных

Если подключиться параллельно к линиям RX и TX, то сможем наблюдать следующую осциллограмму, см. Рис.12.

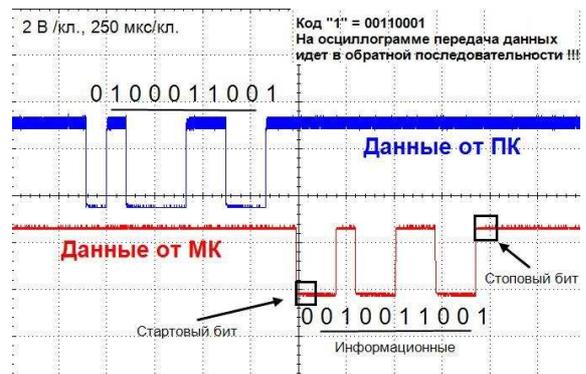


Рис. 12 Осциллограмма передачи/приёма данных ПК-STM32VLDISCOVERY

На данной осциллограмме хорошо видно некоторые особенности:

1. передача данных осуществляется в обратной последовательности, т.е. первым передаётся 0 бит данных, потом 1 и т.д.
2. в начале передачи идет стартовый бит - всегда «0»;
3. передача заканчивается стоповым битом - всегда «1».

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/interface/rs232/start.htm>  
[2] Terminal. Com port development tool. URL: <https://sites.google.com/site/terminalbpp/> (дата обращения 5.02.14).  
[3] Wikipedia URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/Универсальный\\_асинхронный\\_при\\_ёмпередатчик](https://ru.wikipedia.org/wiki/Универсальный_асинхронный_при_ёмпередатчик)



**Вадим Аркадьевич Жмуд** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

E-mail: [oa0\\_nips@bk.ru](mailto:oa0_nips@bk.ru)



**Трубин Максим Витальевич** - студент группы АА-46 кафедры Автоматики НГТУ

E-mail: [tmv.kba@gmail.com](mailto:tmv.kba@gmail.com)



**Трубин Игорь Витальевич** - зам. дир. "КБ Автоматика"

E-mail: [tiv.kba@gmail.com](mailto:tiv.kba@gmail.com)

## Exchange of Data between the Computer and the Microcontroller STM32F100 by Serial Communication Interface RS-232

V.A. ZHMUD, I.V. TRUBIN,  
M.V. TRUBIN

*Abstract:* In today's world, automated control systems are widely used, but the control is impossible without communication between the devices. Currently set of communication interfaces are used, but undoubtedly RS-232 is still the easiest and most popular one. The paper deals with the serial data exchange between the microcontroller of a series of STM32F100 and computer via RS-232. The paper gives brief historical information on this interface. It proposes the description of the converter USB / RS232 based on the popular chip PL2303. It gives the way of connection to the computer in details. In addition, the paper gives the technique of checking of the transmitter without the use of other communication devices. Discuss of the example of the code is there also. Paper reveals the features of the program "Terminal". The paper gives waveforms to improve the understanding of the process of data transmitting and receiving.

*Keywords:* RS-232, USART, STM32, STM32F100, Terminal, STM32VLDISCOVERY

## REFERENCES

- [1] URL: <http://www.gaw.ru/html.cgi/txt/interface/rs232/start.htm>  
[2] Terminal. Com port development tool. URL: <https://sites.google.com/site/terminalbpp/> (Data: 5.02.14).  
[3] Wikipedia URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BD%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9\\_%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%91%D0%BC%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BD%D0%B8%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%81%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%B0%D1%81%D0%B8%D0%BD%D1%85%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D0%BF%D1%80%D0%B8%D1%91%D0%BC%D0%BE%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D1%82%D1%87%D0%B8%D0%BA)

# Модернизация модели робота-пылесоса

Агапов Е.В., Никулин В.С.  
ФГБОУ ВПО «НГТУ», Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Была исследовано устройство робот-пылесос *Xrobot XR-510A*, и выявлены явные недостатки. Ей не хватает всасывающей мощности цилиндрической щетки, а в некоторых случаях мелкие вещи могут заблокировать работу до вмешательства владельца. Режим работы задает зигзагообразный маршрут для уборки, что в лучшем случае убирает 70% комнаты. Практическое применение микроконтроллера *Arduino Pro Mini* позволяет запрограммировать несколько режимов работы, и смена мотор-редукторов на цилиндрической щетке в комплексе повысит эффективность уборки до 80-90%.

**Ключевые слова:** робот-пылесос, робототехника, *Arduino*, микроконтроллер

## ВВЕДЕНИЕ

Главное достоинство роботизированного аппарата - отсутствие человеческого фактора. Устройство будет само выбирать путь для уборки в соответствии с режимом работы. В связи с его компактными размерами, ему не составит труда убирать в труднодоступных местах. Владелец может сам задавать время начала уборки и дату, аппарат будет работать строго по расписанию, и

когда хозяин будет дома, пылесос не будет его отвлекать. Когда у устройства батарея близка к разрядке, оно отправляется на базу для подзарядки.

## 1. ХОД РАБОТЫ

Характерной чертой модернизации была реализация системы управления устройством на микроконтроллере *Arduino*, что позволяет запрограммировать все функции современных моделей. Старым моделям не хватает мощности преодолевать некоторые препятствия, простым решением будет заменить старые мотор-редукторы на более мощные. Замена мотор-редукторов на колесах, цилиндрической щетки всасывания и установка микроконтроллера для управления произведено в соответствии со структурной схемой (Рис. 1). После всех манипуляций по модернизации, необходимо подключить обратно 4 ик-датчика, щетку, 2 колеса и 3 кнопки, контроллер заряда батареи на контакты с 1-7 и с 13-16 *Arduino*, а на контакты 8-12 рекомендуется подключить *LCD*-дисплей. Предварительно нужно скомпилировать и загрузить код программы на *Arduino*.

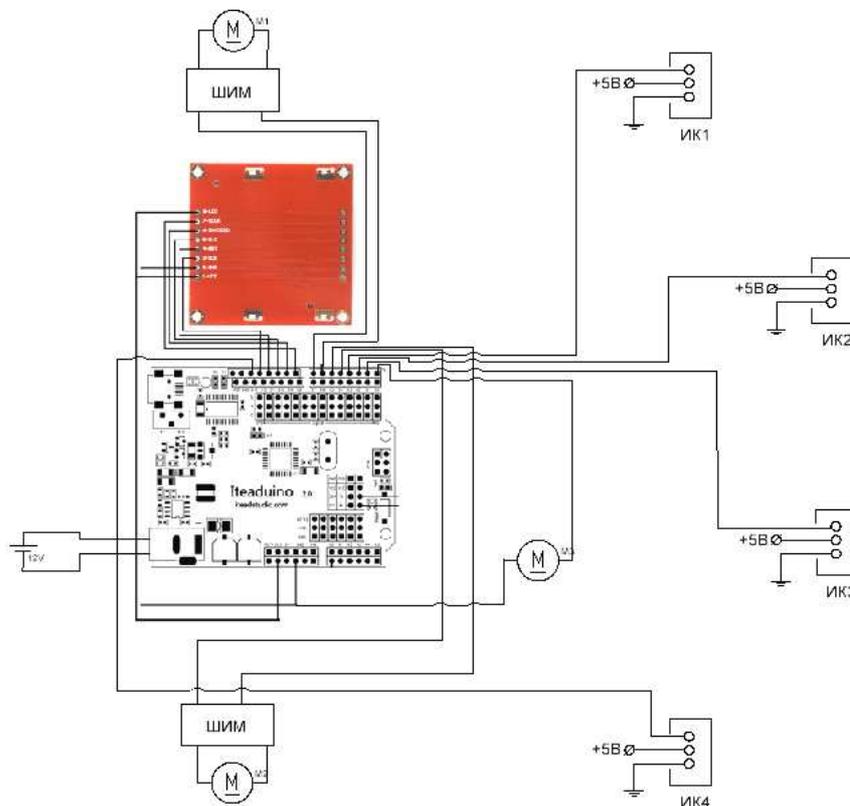


Рис. 1. Структурная схема

## 2. ПРИНЦИП РАБОТЫ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ

Робот-пылесос имеет 3 кнопки, которыми задается режим работы, время начала уборки и день, все функции отображаются на LCD дисплее. Следуя своему режиму, он начнет уборку, в ходе которой он составит детальный план комнаты (размер комнаты, помехи, труднодоступную область) и при каждом режиме и подходе он будет повторять аналогичные действия. Это приведет к тому, что на программном уровне он самостоятельно сравнит результаты и выявит лучшую комбинацию режимов. Ик-датчики позволяют роботу обнаруживать и объезжать препятствия. Если на одном из четырех датчиков появится логическая «1», то сигнал на

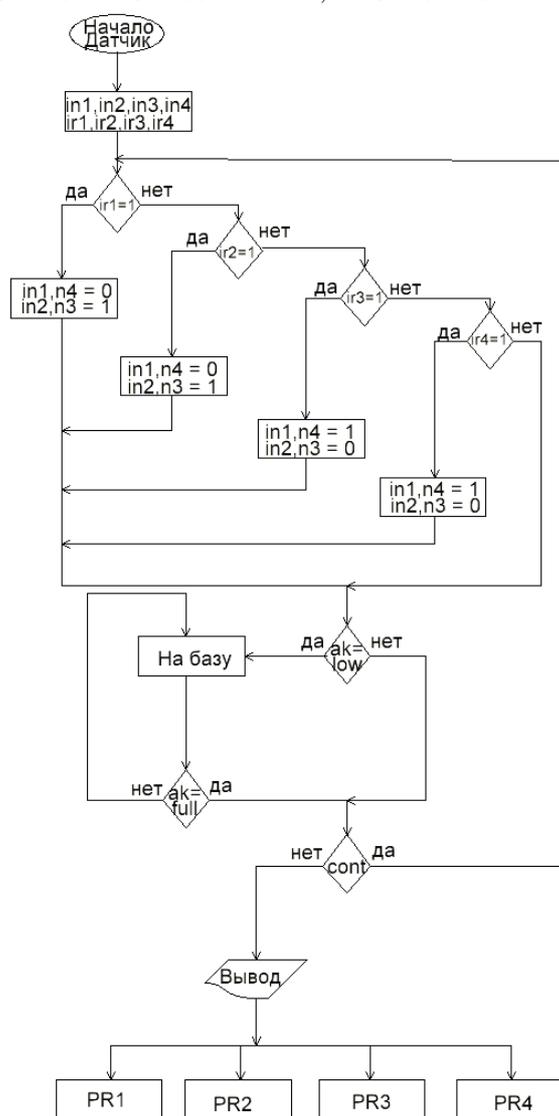
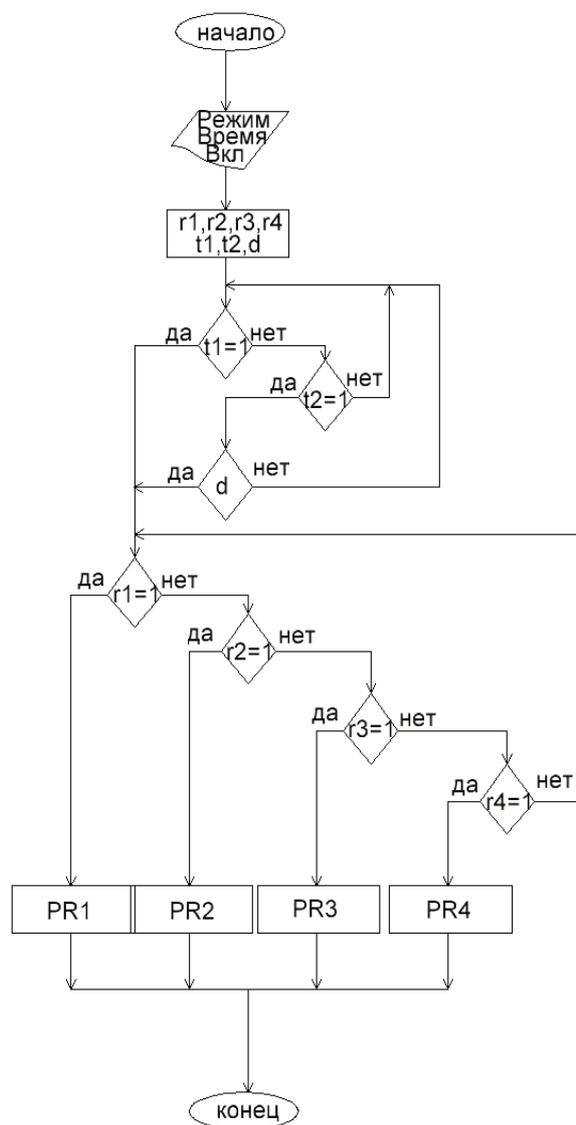


Рис.2. Блок-схема работы алгоритма

## 3. ПРИНЦИП РАБОТЫ АЛГОРИТМА

В главном модуле программы присутствуют 8 переменных, в том числе переменные r1 - r3 отвечают за режимы: зигзагообразный, спиралевидный, вдоль стен, 4 режим формируется

соответствующем контакте изменяет свое состояние. Произойдет прерывание программы, робот останавливается и поворачивает в противоположную сторону от препятствия, после чего продолжает свой путь. Блок «ШИМ» необходим, чтобы управлять движением мотор-редукторов вперед и назад. Контроллер заряда батареи будет следить за степенью заряда, когда заряд достигнет критического значения, он отправит сигнал на микроконтроллер, произойдет прерывание работы программы и робот отправится на базу для подзарядки и смены пылесборника, предварительно запомнив где остановился и с какого места затем необходимо продолжить работу.



программным путем и комбинирует все три предыдущих, переменная t1 –команда начать уборку сразу, t2 – задать время, d – задать дату. После того как выбраны желаемые настройки, программа начинает работать с соответственного режима. В системе должны присутствовать два

обработчика прерываний, от ик-датчиков для избежания столкновений с помехами и от контроллера заряда. Как только прерывания будут обработаны, программа возвращается к тому же самому состоянию, при котором произошло прерывание. Переменные  $ir1 - 4$  хранят состояния ик-датчиков соответственно, а  $in1 - 4$  вращательный момент мотор-редукторов:  $in1, in2$  левый,  $in3, in4$  правый мотор-редукторы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возможна и дальнейшая модернизация модели с помощью инфракрасного передатчика, который позволит роботу передавать пройденный им маршрут на ПК-пользователя, а тот в свою очередь сможет корректировать его.

Затраты на модернизацию:

- Корпус старой модели (7 000 рублей.)
- 3 мотор-редуктора (1200 рублей.)
- Arduino (600 рублей.)
- Итого около 10 000 рублей.
- Аналогичная по функциональности модель стоит 17 000-25 000 рублей

В результате небольшой модернизации робот приобрел следующие дополнительные функции:

- преодолевать более сложные препятствия;
- оптимизировать траекторию уборки с помощью модификации кода, что позволило добиться повышения качества уборки;
- соответствовать по функциональности моделям, которые стоят дороже примерно на 7 000 рублей.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] П. Хорвиц, У. Хилл, Искусство схемотехники. учебник в 3 томах.
- [2] Sommer U. Программирование микроконтроллерных плат Arduino/Freeduino (+CD). Учебник. под ред. В. Букирева 2012 г.
- [3] Б. Керниган, Д. Ритча. Язык программирования Си. Учебник.



Агапов Ефим Вячеславович - студент кафедры автоматки НГТУ. [agapovefm@gmail.com](mailto:agapovefm@gmail.com)



Никулин Владимир Сергеевич - студент кафедры защиты информации НГТУ [nikulin-94@inbox.ru](mailto:nikulin-94@inbox.ru)

## The Modernization of the Mathematical Model of Vacuum Cleaner Robot

E.V. AGAPOV, V.N. NIKULIN

*Abstract:* We studied the device, the robot cleaner Xrobot XR-510A, and identified the obvious shortcomings. It lacks the suction power of the cylindrical brush. In addition, in some cases small things can block the work until the intervention of the owner or operator. Operating mode sets the zigzag route for cleaning that provides cleaning of 70% of the room at the best. Practical application of microcontroller Arduino Pro Mini allows you to program several operating modes, and change gear motors on the cylindrical brush in the complex will increase cleaning efficiency up to 80-90%.

*Keywords:* robot vacuum cleaner, robotics, Arduino, a microcontroller

## REFERENCES

- [1] P. Horvic, U. Hill, Iskusstvo shemotehniki. uchebnik v 3 tomah.
- [2] Sommer U. Programirovanie mikrokontrol-lernykh plat Arduino/Freeduino (+CD). Uchebnik. pod red. V. Bukireva 2012 g.
- [3] B. Kernigan, D. Ritcha. Jazyk programirovaniya Si. Uchebnik.

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

### Содержание раздела:

- Жмудь В.А., Трубин М.В. Регулятор с разделением «правильных» и «неправильных» движений. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 57–62.
- Изтилеуов М.А., Рахимов Н.Р., Отениязов Р.И. Нейро-нечеткое моделирование изменений уровней грунтовых вод Кегейлийского водозабора. Каракалпакская гидрогеологическая станция ГП «Приаральская ГГЭ» (Узбекистан), НГТУ (Россия), ТУИТ (Узбекистан). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 63–67.

# Регулятор с разделением «правильных» и «неправильных» движений

В.А. Жмудь, М.В. Трубин  
ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия)

**Аннотация.** При управлении объектами, склонными к колебаниям, настройка регулятора зачастую достаточно сложна. Один из эффективных методов отыскания коэффициентов регулятора при заданной структуре – метод численной оптимизации. Этот метод предполагает моделирование системы с регулятором, в котором задаются различные коэффициенты, при этом программное обеспечение обеспечивает автоматическое отыскание оптимальных значений коэффициентов, которые обеспечивают минимум заданной наперед целевой функции. Эта целевая функция, как правило, содержит интеграл от модуля или квадрата ошибки по времени, а также может содержать дополнительные неотрицательные слагаемые, которые служат для обеспечения требуемых свойств системы. Ранее нами предложено вводить слагаемое, которое возрастает при наличии в переходном процессе участков, на которых ошибка возрастает по величине. Такое слагаемое формируется из произведения ошибки на ее производную, которое пропускается через нелинейный элемент, пропускающий только положительный сигнал, и не пропускающий отрицательный (то есть ограничивает величину снизу нулевым значением). Такой детектор роста ошибки может быть использован для разделения переходного процесса на различные участки, а именно: на участки, где величина ошибки не возрастает, и на участки, где она возрастает. В данной статье предлагается для каждого из двух типов таких участков использовать индивидуально настраиваемые коэффициенты регулятора. По крайней мере, это может оказаться целесообразным для дифференцирующего и (или) пропорционального каналов регулятора, целесообразность такого разделения для интегрирующего канала сомнительна. Поэтому идея статьи состоит в том, чтобы разделить движения в системе на те, которые идут в верном направлении и на те, которые идут в неверном направлении. При этом предлагается использовать два различных регулятора – для движений в правильном направлении применять регулятор с одним набором коэффициентов, а для движений в неправильном направлении – регулятор с другим набором

коэффициентов. Правильными движениями называем такие движения, при которых ошибка уменьшается, или остается постоянной, то есть произведение ошибки на ее производную по времени отрицательно или равно нулю. Неправильными движениями называем прочие движения – когда произведение ошибки на ее производную положительно, то есть ошибка по величине возрастает. Для различия видов движения применен специальный детектор «правильности» движений.

**Ключевые слова:** регулятор, автоматика, обратная связь, быстродействие, точность, управление, переходный процесс, численная оптимизация

## ВВЕДЕНИЕ

Высокоточное управление объектами актуально во многих отраслях промышленности, техники, технологии и науки. Эти задачи решаются с помощью систем с обратной связью, в которых осуществляются соответствующие изменения входных управляющих сигналов, поступающих на объект для обеспечения требуемого значения выходных величин объекта управления. Зависимость выходной величины объекта от входного сигнала определяется его математической моделью. Часто используются модели в виде амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик, то есть зависимости амплитуды и фазы выходного сигнала от частоты входного сигнала. Встречаются объекты, склонные к колебаниям выходной величины.

Для решения задачи управления такими объектами могут применяться системы с обратной связью, содержащие традиционные регуляторы с пропорциональным, интегрирующим и дифференцирующим трактами (ПИД-регуляторы). Коэффициенты этих трактов рассчитываются разными методами.

Общий вид выходного сигнала ПИД-регулятора задается уравнением:

$$U(t) = K_p E(t) + K_D \frac{dE(t)}{dt} + K_I \int_{t_0}^t E(t) dt. \quad (1)$$

Здесь  $K_p$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  – коэффициенты усиления пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего каналов регулятора.

Проектирование регулятора состоит в этом случае в вычислении таких значений этих коэффициентов, которые обеспечат требуемое быстродействие, точность и устойчивость системы. Например, они могут быть рассчитаны методом численной оптимизации [1].

При управлении объектами, склонными к колебаниям, поиск регулятора может оказаться чрезвычайно сложным. Например, процедура численной оптимизации может не привести к отысканию коэффициентов регулятора, которые бы обеспечили достаточное быстродействие с достаточно высоким качеством переходного процесса. Качество переходного процесса оценивается по следующим параметрам: а) наличие или отсутствие перерегулирования, а в случае его наличия – его величина; б) монотонность или немонотонность переходного процесса до начала первого достижения предписанного уровня; в) количество колебаний около предписанного равновесного состояния и скорость их затухания (то есть отношение амплитуд двух последующих колебаний). Также переходные процессы характеризуются их длительностью и остаточной статической ошибкой.

Недостаточно высокое качество переходного процесс может проявляться, например, в большом перерегулировании, или в большом количестве колебаний и, соответственно, слабом их затухании, или в немонотонности переходного процесса на начальном участке. В настоящей статье ставится задача отыскания метода дальнейшего повышения качества переходного процесса при управлении объектами, склонными к колебаниям.

## 1. ПРЕДЛАГАЕМЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Предлагается решение поставленной задачи решается путем разделения переходного процесса на два вида, а именно: а) на участки, где величина ошибки убывает или постоянна; б) на участки, на которых величина ошибки возрастает.

Для определения таких участков необходим соответствующий детектор.

Один из вариантов схемы такого детектора показан на Рис. 1.

С учетом такого детектора предлагается система, показанная на Рис. 2.

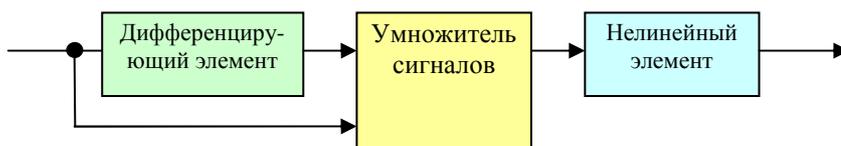


Рис. 1. Детектор

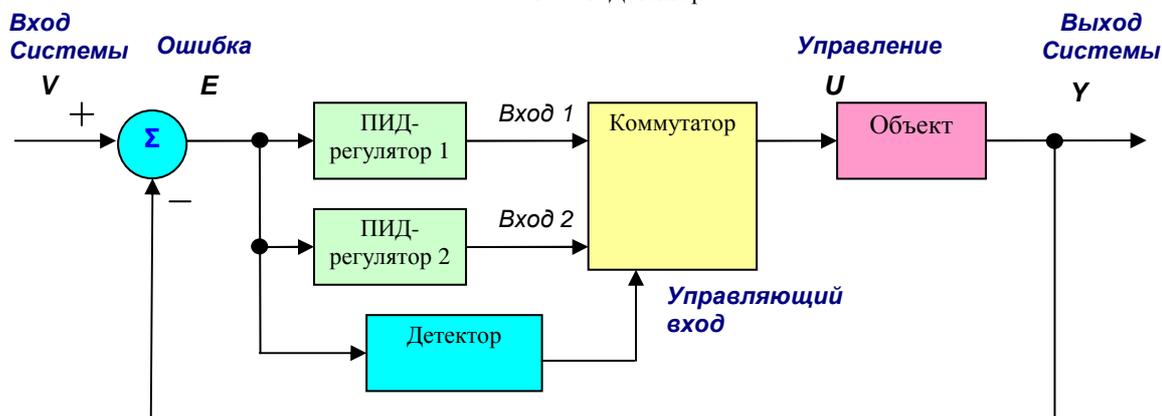


Рис. 2. Предлагаемая система

Предлагаемая система работает следующим образом. В исходном состоянии коммутатор подключает на свой выход, а значит и на вход объекта один из своих входов, то есть выход одного из регуляторов, первого или второго. Таким образом, контур управления системы получается замкнутым с использованием одного из двух регуляторов. Этот контур работает как в любой системе с обратной связью, а именно: выходной сигнал объекта вычитается из входного сигнала системы, получаемая на

выходе вычитающего устройства разница является сигналом ошибки  $E(t)$ . Этот сигнал ошибки преобразуется одним из регуляторов в управляющий сигнал, который поступает через коммутатор на вход объекта и воздействует на него так, чтобы изменить его выходной сигнал в нужную сторону. Вследствие действия обратной связи выходной сигнал объекта становится равным предписанному значению, поступающему на вход системы. При этом детектор анализирует сигнал ошибки с

выхода вычитающего устройства и на его основе формирует логический сигнал, который управляет работой коммутирующего устройства. В зависимости от этого сигнала на выход этого коммутирующего устройства поступает сигнал с его первого или с его второго входа. Детектор в зависимости от того, уменьшается ли она по величине, или не уменьшается, подключает первый или второй регулятор. Оба этих регулятора заранее настраиваются методом численной оптимизации в составе схемы, реализующей такое переключение.

Теоретическое обоснование этого метода можно дать на основе следующих соображений. Поскольку «правильные» и «неправильные» изменения выходного сигнала объекта в составе системы могут чередоваться, можно это трактовать, как чередование «правильной» и «неправильной» работы регулятора. Поэтому может быть поставлен вопрос о корректировке «неправильной» работы регулятора путем изменения его коэффициентов. Для проверки продуктивности этой идеи достаточно

осуществить моделирование такой системы, при этом оба регулятора могут иметь одинаковые математические модели, но различные коэффициенты усиления, которые определяются методом численной оптимизации. Если указанный метод не эффективен, то процедура численной оптимизации должна давать одинаковые коэффициенты для обоих регуляторов, поскольку переключение регуляторов не приводит к снижению величины целевой функции. Если моделирование показывает, что всегда процедура дает разные коэффициенты для двух регуляторов, то это можно считать подтверждением эффективности метода для исследованных видов регуляторов.

Данная система может быть дополнительно усовершенствована, как показано на Рис. 3.

Положительный эффект такого усовершенствования состоит в том, что нет необходимости переключать интегральный тракт регулятора. Поэтому предлагается этот тракт регулятора включить помимо коммутатора, непосредственно на вход объекта, но сумматор для этих целей необходим.

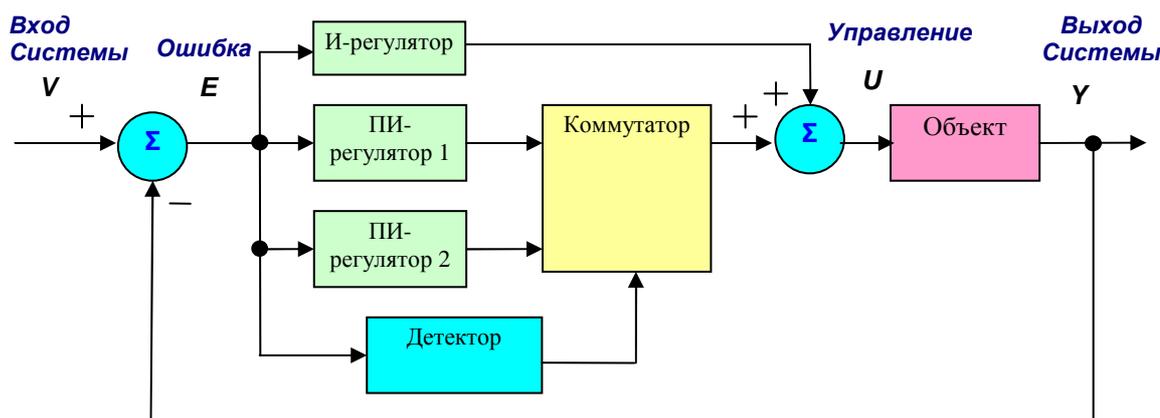


Рис. 3. Усовершенствованный вариант предлагаемой системы

Предлагаемая система, показанная на Рис. 3, с учетом внутренней структуры, проще, чем система, показанная на Рис. 2, поскольку в системе по Рис. 2 в каждом из регуляторов имеется по тракту, и по одному сумматору с тремя входами, а в системе по Рис. 3 в каждом из этих регуляторов имеется только по два тракта и по одному сумматору на два входа. При этом в системе по Рис. 2 имеется шесть настраиваемых параметров, а в системе по Рис. 3 таких параметров только пять (интегральный регулятор имеет постоянный коэффициент). Отметим, что упрощение не является самоцелью: традиционный ПИД-регулятор еще проще, но в структуре по Рис. 3 все же предполагается положительный эффект, который оправдывает это усложнение.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА

Для иллюстрации эффективности предлагаемого метода осуществлено моделирование такой системы по структуре, показанной на Рис. 3. При этом математическая модель объекта задана в виде передаточной функции следующего вида:

$$W_o(s) = \frac{1}{s^3 + s^2 + s + 1}. \quad (2)$$

Здесь  $s$  – аргумент преобразования Лапласа, аналогичный оператору дифференцирования при описании объекта в форме дифференциальных уравнений.

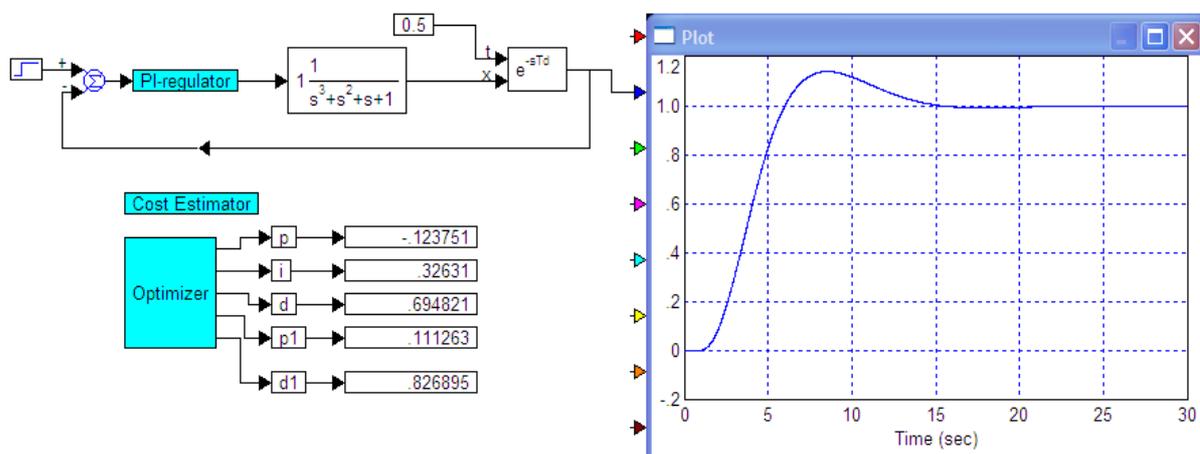
На Рис. 4 показан проект для моделирования в программе VisSim системы по структуре Рис. 3. В этой структуре используются три

составных блока: регулятор (*PI-regulator*), оптимизатор (*Optimizer*) и блок для оценки стоимостной функции (*Cost Estimator*). При моделировании использовались различные виды регуляторов, а не только ПИ-регулятор, но название блока сохранено, чтобы не переделывать весь проект, а вносить изменения только путем редактирования структуры блока.

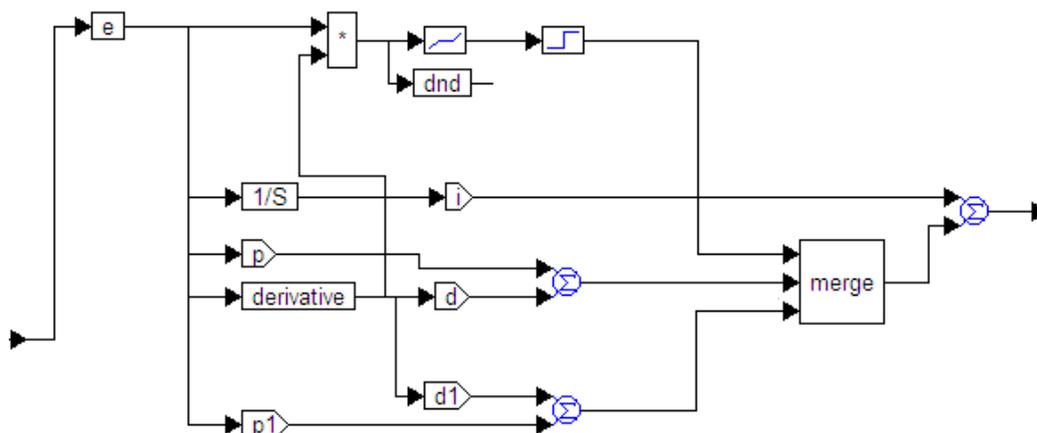
На *Рис. 5* показана внутренняя структура регулятора, на *Рис. 6* – внутренняя структура блока оценки стоимостной функции, а на *Рис. 7* – структура оптимизатора.

В блоке оценки целевой функции имеется вычислитель интеграла от модуля ошибки, умноженного на время. Также под интеграл введен с коэффициентом, равным десяти, выходной сигнал детектора неправильных движений. Этот сигнал обозначен переменной *dnd*. Как видно из *Рис. 5*, в этом детекторе ошибка управления, обозначенная переменной

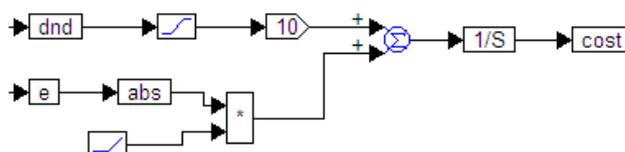
*e*, умножается на блоке умножения, обозначенного символом [\*], на производную от ошибки. Производная вычисляется блоком *derivative*. Произведение ошибки на ее производную с выхода блока умножения поступает на два последовательно соединенных нелинейных элемента: ограничитель и реле. Совместно они образуют требуемый нелинейный элемент, показанный на *Рис. 1*. Если ошибка возрастает по величине, то указанное произведение положительно, а если она убывает по величине, то это произведение отрицательно. Нелинейный элемент преобразует этот сигнал в дискретный сигнал с двумя выходными значениями. Этот сигнал поступает на вход блока *merge*, осуществляющего подключение одного из своих аналоговых входов к своему выходу, то есть реализующего функции коммутатора.



*Рис. 4.* Структура и переходные процессы



*Рис. 5.* Структура регулятора *PI-regulator* (здесь реализован ПИД-регулятор)



*Рис. 6.* Структура блока оценки стоимостной функции *Cost Estimator*

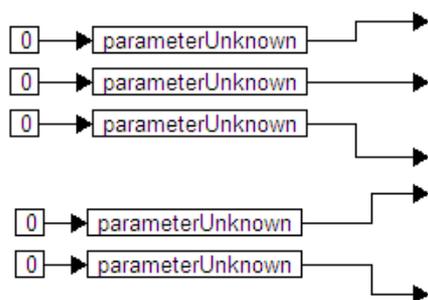


Рис. 7. Структура блока Optimizer

Расчет коэффициентов выполнен в режиме оптимизации, предусмотренном в программе VisSim [3–6].

Для сравнения использовался простой ПИД-регулятор. График, полученный с указанной системой, показан на Рис. 4 справа, а график, получаемый с простым ПИД-регулятором,

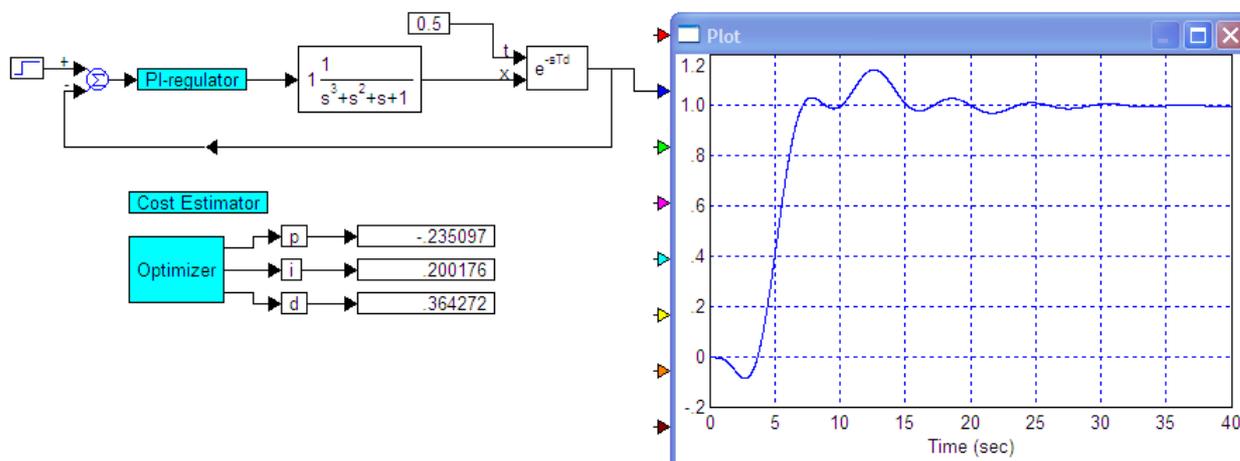


Рис. 8. Структура с простым ПИД-регулятором и переходные процессы

Также косвенным признаком эффективности предложенного метода служит тот факт, что процедура оптимизации дала существенно различные значения для коэффициентов ПИД-регулятора, они даже имеют разные знаки. Эти значения указаны в выходных дисплеях получаемых переменных. А именно: в случае применения простого ПИД-регулятора расчет дал следующие коэффициенты регулятора:  $K_{\text{П}} = -0,235$ ;  $K_{\text{И}} = 0,200$ ;  $K_{\text{Д}} = 0,364$  – соответственно коэффициенты пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего трактов. В случае применения системы по Рис. 4, получены коэффициенты для первого регулятора:  $K_{\text{П}} = -0,123$ ;  $K_{\text{Д}} = 0,695$ ; коэффициенты для второго регулятора:  $K_{\text{П}} = 0,111$ ;  $K_{\text{Д}} = 0,286$ ; коэффициенты для третьего регулятора  $K_{\text{И}} = 0,326$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема

представлен на Рис. 8 справа.

Видно, что качество управления на Рис. 4 лучше, чем качество управления на Рис. 8. Действительно, в первом случае процесс изначально монотонный, пока не пересекает уровень предписанного значения. Далее имеется перерегулирование на величину около 15 %, после чего процесс плавно (асимптотически) устремляется к предписанному значению практически без дополнительных колебаний. Во втором же случае процесс в начальном этапе идет в ошибочном направлении, но вверх, а вниз. После достижения предписанного значения он достигает небольшого перерегулирования, но затем вновь отклоняется, и перерегулирование достигает тех же 15 %. Имеются колебания, как минимум, с четырьмя отчетливо различимыми максимумами.

проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В.А., Ядрышников О.Д. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). Стр. 24–29. URL: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-4.pdf>
- [2] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Повышение качества переходного процесса при управлении склонными к колебаниям объектами. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 3 (5). С. 12–17. рис. 4, URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AIPI-3-2013-2.pdf>
- [3] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. 335 с.
- [4] Жмудь В.А. Динамика мехатронных систем: учеб. пособие / В.А. Жмудь, Г.А. Французова, А.С.

Востриков. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2014. – 176 с. ISBN 978-5-7782-2415-5.

- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин. Метод проектирования энергосберегающих регуляторов для сложных объектов с частично неизвестной моделью. В кн.: Проблемы управления и моделирования в сложных системах. Труды XVI Международной конференции 30 июня – 03 июля 2014 г., Самара. Россия. С. 557–567.



**Вадим Аркадьевич Жмуд** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

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



**Трубин Максим Витальевич** – студент кафедры Автоматики НГТУ.

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

## Regulator with Division of "Right" and "Wrong" Movements

V.A. ZHMUD, M.V. TRUBIN

*Abstract.* When controlling of objects prone to oscillations, regulator tuning is often quite complex. One of the most effective methods of finding the coefficients of the regulator for a given structure is method of numerical optimization. This method involves simulation of the system with the regulator, in which different coefficients are set. The software makes automatic search for the optimal values of coefficients that provide the minimum of the given cost function. This cost function usually includes integral of the modulus of the square of error during time, and may contain additional non-negative terms, used to provide the required properties of the system. Previously, we proposed to introduce a term, which increases in the presence of transient processes of areas where error increases in magnitude. This term is formed from the product of errors at its derivative, which is passed through a nonlinear element, which

transmits only the positive signal (i.e. it has lower limit of zero value). Such growth error detector may be used for separation of the transient to different parts, namely on the portions where the error not rises, and ones where it rises. This paper proposes for each of the two types of process using of the individually adjustable coefficients of the regulator. At least, it may be appropriate for derivative and (or) for the proportional control channel. The appropriateness of such a division for integrating channel is questionable. Therefore, the idea of the paper is to share the movement of the system to ones that go in the right direction and those that go in the wrong direction. It proposes to use two different regulators. Namely, for movements in the right direction the use of the regulator with one set of coefficients and for movements in the wrong direction the use of it with the different set of coefficients. We call correct movements such movements in which the error decreases, or remains constant, i.e., the product of an error on its time derivative is negative or zero. We call wrong movements other movements, when the product of error with its derivative is positive; hence, the error increases in magnitude. To distinguish types of motions we use the special detector of the "correctness" of the movement.

*Keywords:* control, automation, feedback, speed, accuracy, control, transient numerical optimization

## REFERENCES

- [1] Zhmud V.A., Yadrishnikov O.D. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). Ctr. 24–29. URL: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/3/Paper-2013-1-4.pdf>
- [2] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Povyshenie kachestva perehnogo processa pri upravlenii sklonnymi k kolebanijam ob#ektami. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2013. № 3 (5). S. 12–17. ris. 4, URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/AIPI-3-2013-2.pdf>
- [3] V.A. Zhmud. Simulation study and optimization of closed systems of automatic control. Novosibirsk, Publishing House of the NSTU, 2012. 335 p.
- [4] V.A. Zhmud, G.A. Frantsuzova, A.S. Vostrikov. Dynamics of mechatronic systems: Proc. Manual. Novosibirsk: Publishing House of the NSTU, 2014. - 176 p. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [5] V.A. Zhmud, O.D. Yadrishnikov. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. Proceedings of the 8-th International Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013), vol. II, 28 June – 1 July. Mongolian University of Science and Technology, Ulaanbaator, Mongolia. IEEE organized. 2013. P. 265 – 270. <http://www.must.edu.mn/IFOST2013/>
- [6] V.A. Zhmud, A.N. Zavorin. Method of designing energy-efficient controllers for complex objects with partially unknown model. Proc. : The control and modeling in complex systems. Proceedings of the XVI International Conference June 30 - July 3, 2014, Samara. Russia. p. 557-567.

# Нейро-нечеткое моделирование изменений уровней грунтовых вод Кегейлийского водозабора

М.А. Изтилеуов<sup>1</sup>, Н.Р. Рахимов<sup>2</sup>, Р.И. Отениязов<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Каракалпакская гидрогеологическая станция ГП «Приаральская ГГЭ» (Узбекистан),

<sup>2</sup> НГТУ (Россия), <sup>3</sup> ТУИТ (Узбекистан).

**Аннотация.** Для изучения изменений уровней грунтовых вод (УГВ) в зависимости от времени года (месяц, сезон, год) применяется перспективный подход, основанный на использовании метода нейро-нечеткого моделирования на основе информации числового и нечеткого вида в пределах единого информационного пространства. Статья посвящена нейро-нечеткому моделированию, проведению вычислительных экспериментов и графической визуализации полученных результатов на базе пакетов *FLT* и *ANFIS* среды *MATLAB*.

**Ключевые слова:** нечеткие множества, нейронные сети, уровни грунтовых вод, нейро-нечеткая гибридная модель, пакеты *FLT*, *ANFIS*, модель Сугено.

## ВВЕДЕНИЕ

Целью исследований является изучение режима уровня грунтовых вод (УГВ) в Кегейлийском водозаборе подземных вод (ПВ) на основе применения нейро-нечеткого метода.

Моделирование изменений УГВ с помощью временных рядов, состоит из следующих этапов:

- предварительный анализ исходной информации;
- выявление тенденции изменений;
- исключение или сглаживание выбросов;

Исследование проводилось на основе данных Каракалпакской гидрогеологической станций. Предварительная обработка данных изменений уровней грунтовых вод в Кегейлийском водозаборе ПВ с 2001 по 2010г.г. приведена в Табл. 1, а также на Рис. 1.

Дальнейшая обработка этих данных осуществляется на основе нейро-нечеткого подхода [2, 3, 5].

Нейронные сети – мощный метод моделирования, позволяющий воспроизводить сложные нелинейные зависимости. Способность к работе с зашумленными данными и адаптивность дают возможность применять нейронные сети для решения широкого класса геологических задач. За последние несколько лет на основе нейронных сетей было разработано много программных систем для применения в таких задачах, как прогнозирование и оценка геологических параметров, например, УГВ, химический анализ, анализ температуры подземных вод, и т.д.

Нейронные сети обучают на примерах. Разработчик нейронной сети подбирает представительные данные, а затем запускает алгоритм обучения, который автоматически воспринимает структуру данных. При этом от разработчика требуется набор эвристических знаний о том, как следует отбирать и подготавливать данные, выбирать нужную архитектуру сети и интерпретировать результаты.

Таблица 1

Уровень грунтовых вод Кегейлинского водозабора ПВ по месяцам с 2001 по 2010 год

Годы	М е с я ц ы											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
2001	1,90	1,99	2,01	2,06	3,11	2,76	3,35	3,33	2,87	2,95	3,01	3,08
2002	3,12	2,92	2,96	1,80	1,85	0,75	0,81	1,35	1,82	1,60	0,90	1,90
2003	1,40	0,68	0,97	1,35	0,66	1,09	0,90	0,80	1,10	1,70	1,40	0,67
2004	1,87	1,60	2,80	2,76	1,26	0,98	0,93	1,19	1,36	1,60	2,15	1,18
2005	1,20	1,10	1,83	1,73	1,06	1,00	0,75	1,62	2,10	2,12	1,68	1,30
2006	1,43	1,60	1,72	1,80	0,85	0,78	0,75	0,61	1,10	1,98	1,56	0,48
2007	1,77	1,25	1,20	1,27	1,20	0,58	0,09	0,39	0,97	1,34	1,55	0,28
2008	0,88	0,58	0,38	1,11	1,29	1,48	1,73	2,11	2,35	2,23	2,17	1,74
2009	1,90	2,09	2,15	2,17	1,01	1,01	0,58	0,52	1,11	1,71	0,37	0,39
2010	0,97	1,64	0,92	0,75	0,62	0,57	0,43	0,43	0,89	1,24	0,73	0,50

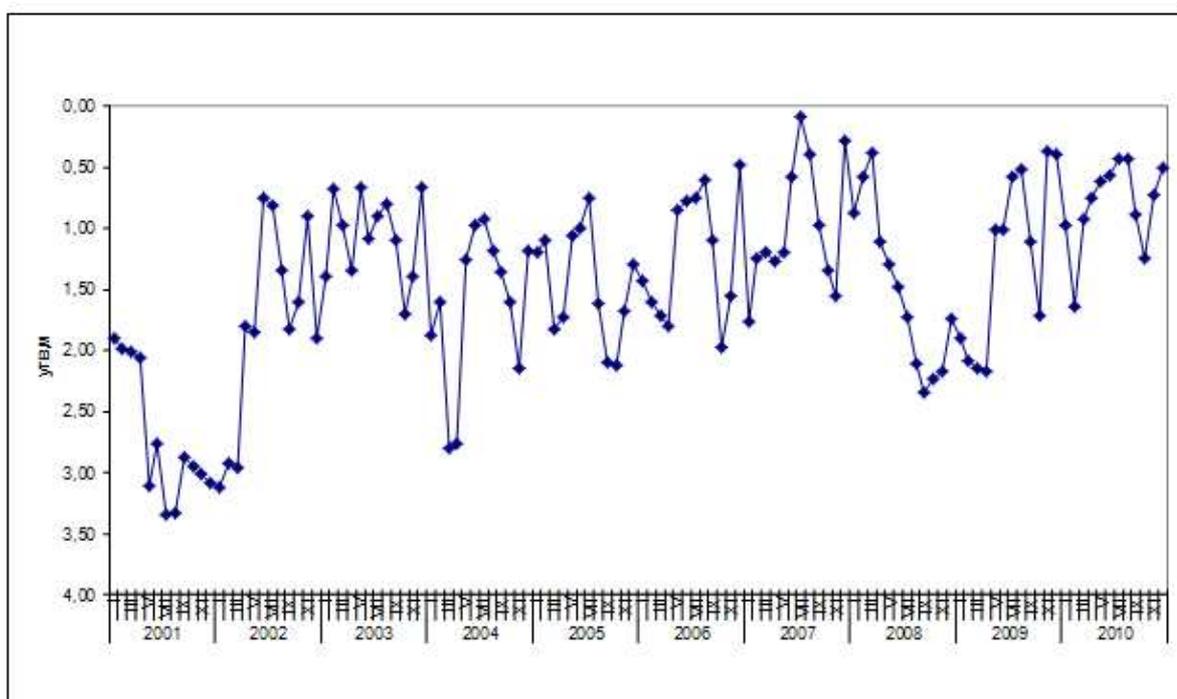


Рис. 1. График многолетних наблюдений за уровнем грунтовых вод по ГХК 2, СКВ 4

Класс задач, которые можно решить с помощью нейронной сети, определяется тем, как сеть работает и тем, как она обучается. При работе нейронная сеть можно применять в ситуации, когда имеется определенная известная информация, и необходимо получить некоторую пока неизвестную информацию.

Для эффективного использования нейронных сетей необходимо наличие достаточного объема обучающей выборки, используя которую нейронную сеть можно обучить.

Если сеть обучено хорошо, она приобретает способность моделировать неизвестную функцию, связывающую значения входных и выходных переменных, и в последствии такую сеть можно использовать для прогнозирования в ситуации, когда выходные значения неизвестны.

### СТРУКТУРА ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим структуру гибридной модели на базе пакета FLТ Matlab. Разрабатывается нейро-нечеткая модель изменений УГВ в зависимости от времен года (месяц, сезон, год). Гибридная модель содержит три входных и одну выходную переменную, т. е. для прогнозирования нового значения УГВ и использовались три предыдущих значения УГВ. Каждая из входных переменных содержит по 3 лингвистических термина с гауссовскими функциями принадлежности, функция принадлежности выходной переменной

является линейной [4].

Структура созданной сети представлена на Рис. 2. Внутренние слои представлены двенадцатью лингвистическими переменными (по 3 на каждую из входных переменных) и 27-ю правилами нечетких продукций, что составляет собой полный набор ( $3^3 = 27$  полный перебор).

На выходе предлагаемой системы вывода применяется модель типа Сугено, так как она дает в качестве значения выходной переменной конкретные числовые значения.

Проверка гибридной модели на обучающем множестве показывает высокую точность аппроксимации (см. Рис. 3).

**Результаты вычислительных экспериментов.** Поверхность системы нечеткого вывода гибридной модели представлена на Рис. 4. Она характеризует зависимость выходной переменной от первой и второй входных переменных.

Для проверки с помощью полученных правил построенной гибридной модели были заданы значения входных переменных из обучающего множества [2001 2,01 2,06] и получили значение выходной переменной. Эти значения близки к реальному значению выходной переменной, которое составляет 3,11. Это означает, что полученная нами гибридная сеть дала хорошие результаты.

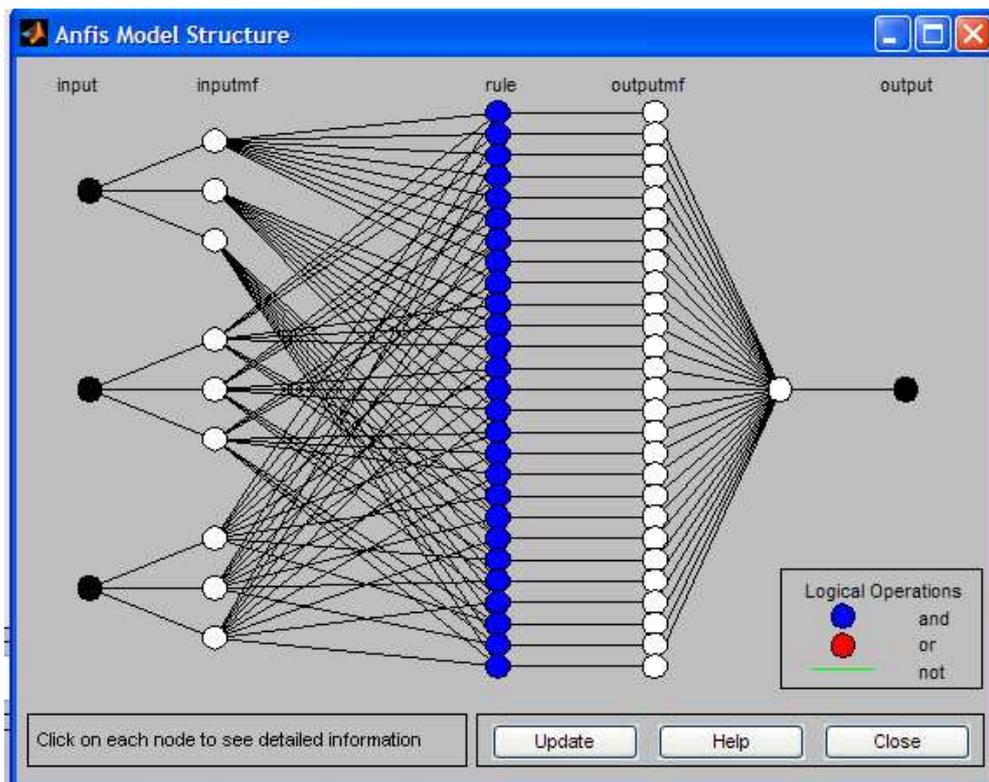


Рис. 2. Структура гибридной модели по сезонам (2001-2010)

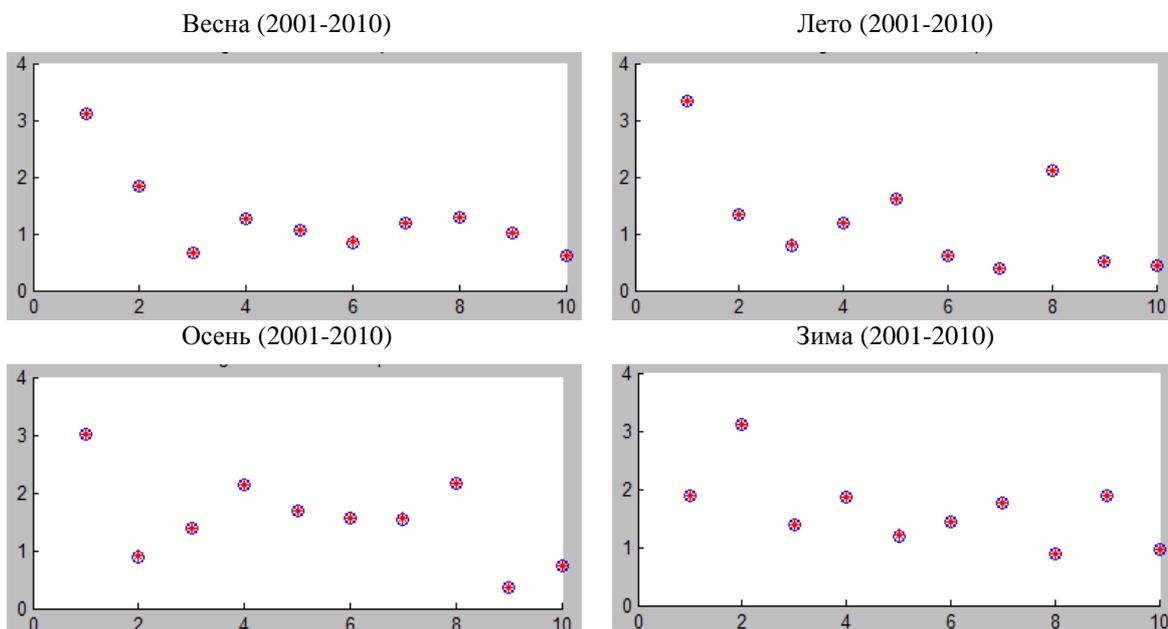


Рис. 3. Проверка работы гибридной модели на обучающем множестве по сезонам (2001-2010)

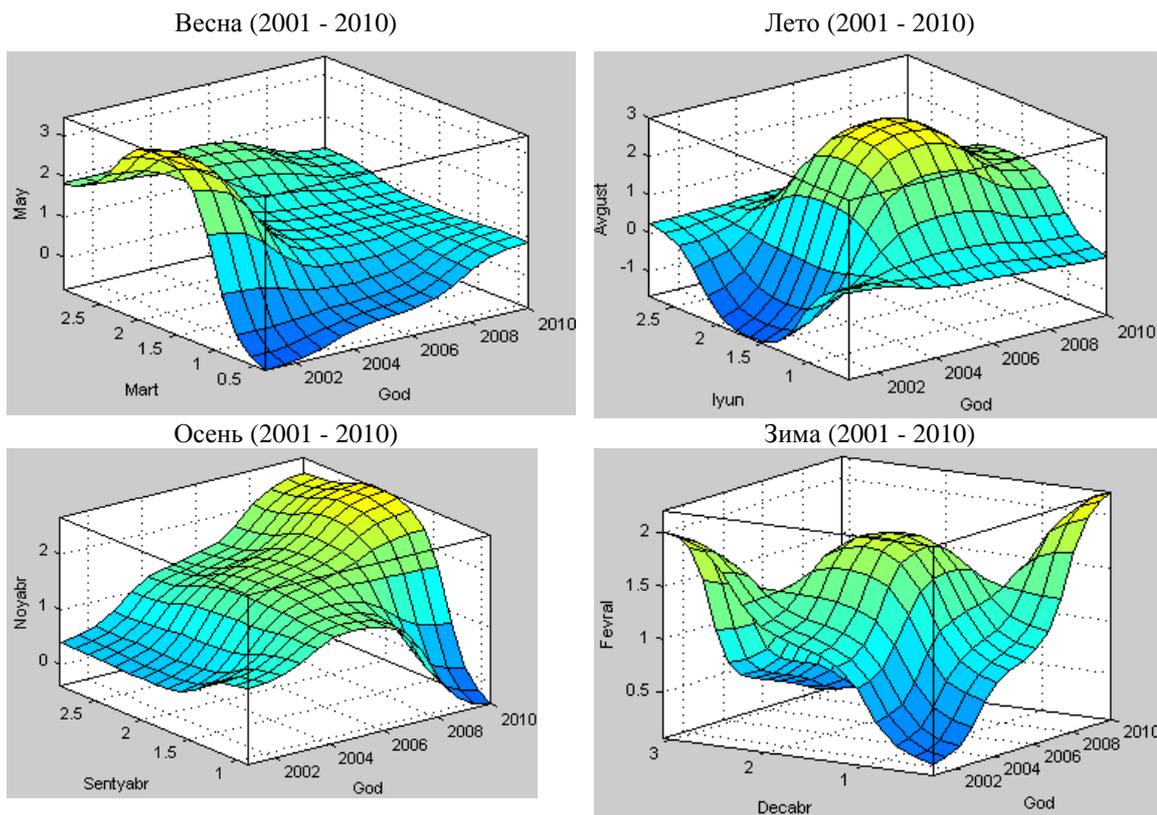


Рис. 4. Поверхность системы нечеткого вывода гибридной модели по сезонам (2001-2010).

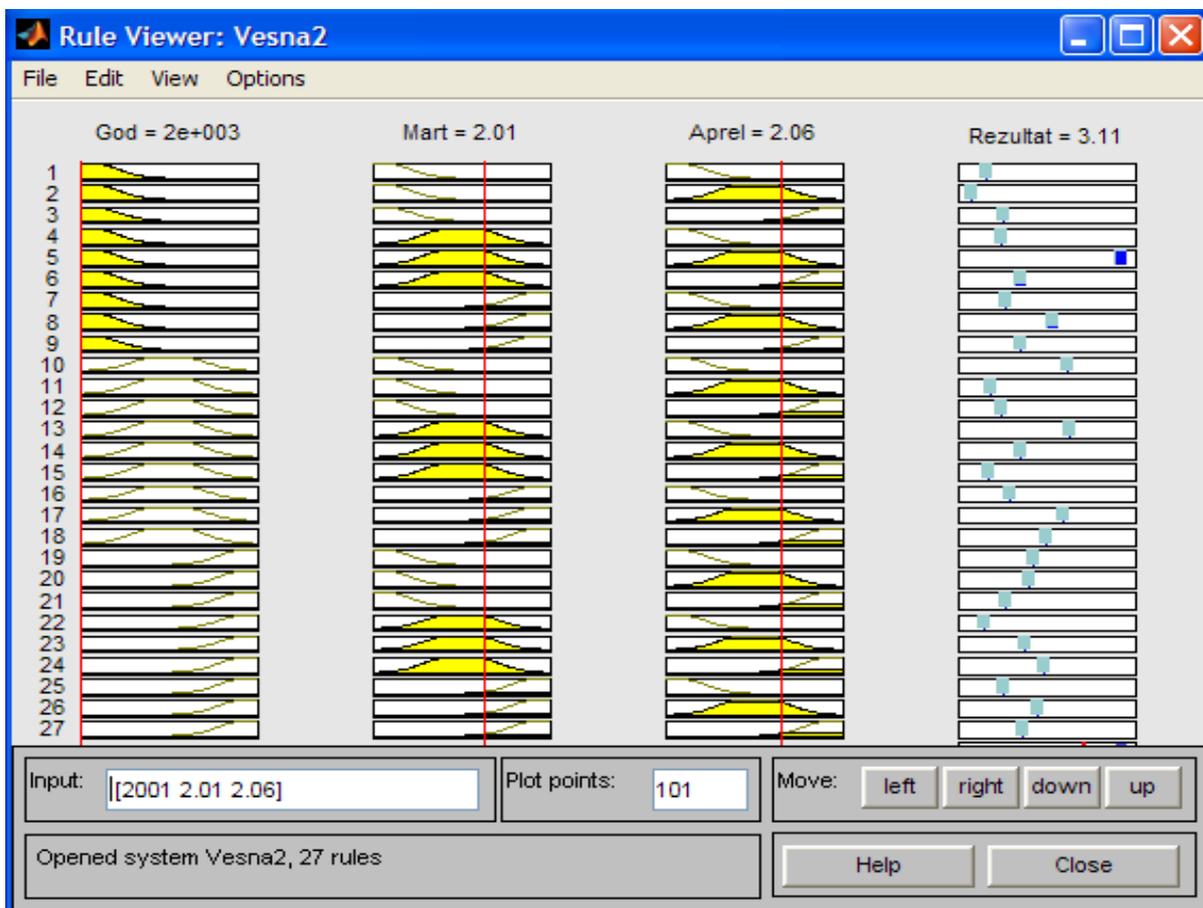


Рис. 5. Редактор правил системы нечеткого вывода для гибридной модели (2001-2010)

Наилучшей моделью прогноза, позволяющей достаточно точно моделировать УГВ в Кегейлинский водозабора ПВ, является гибридной модель.

Главным результатом данного исследования, на наш взгляд является вывод о том, что для адекватного и эффективного моделирования УГВ в Кегейлинский водозабора ПВ с помощью нейросетевых технологий необходимо учитывать тенденции геологического развития. Для обучения и прогноза следует использовать только те периоды времени в пределах, в которые действуют одинаковые геологические тенденции.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Усманов Р.Н., Абдуллаев Б.Д., Мавлонов А.А. Интеграция гибридных нейронных сетей для исследования гидрохимического режима водозаборов подземных вод. Геология и минеральные ресурсы. – 2011. - № 4. – С.39-43.
- [2] Дьяконов В., Круглов В. Математические пакеты расширения MATLAB. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2001. – 480 с.: ил.
- [3] Ротштейн А.П., Митюшкин Ю.И. идентификация нелинейных зависимостей нейронными сетями. Проблемы бионики. – 1998. - №49. – С. 168-174.
- [4] Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 756с.
- [5] Корчак Т.В. Методы анализа и прогнозирования временных рядов с пропущенными данными при использовании нейро-нечетких моделей типа Такаги-Сугэно и адаптивных моделей. Системы управления и навигации, 2009, вып4(12). – С.90-94.
- [6] Коваленко А.В., Уртенев М.Х. Нейросетевое моделирование инфляции в России. Научный журнал КубГАУ, №61(07), 2010 г.

#### Neuro and Indistinct Modeling of Changes of Levels of Earth Waters Kegeyli Groundwater Intakes

M.A. Iztilewov, N.R. Rakhimov,  
R.I. Oteniyazov

*Abstract:* The paper proposes perspective approach based on use of a method of neuro and indistinct modeling on the basis of information of a numerical and indistinct look within a common information space is applied to studying of changes of the levels of ground waters (LGW) depending on seasons (month, a season, year). The paper offering is devoted to neuroindistinctly to modeling, carrying out of computing experiments and graphic visualization of the received results based on Matlab environment including FLT and ANFIS packages.

*Key words:* fuzzy sets, neural networks, levels of

ground waters, neuro and fuzzy hybrid model, FLT, ANFIS packages, Sugeno's model

**Максет Изтилеуов** - Начальник Каракалпакской Гидрогеологической станции Государственный Предприятия «Приаральская Гидрогеологические экспедиция». Автор более 10 научных работ.



**Неъматжон Рахимович Рахимов** – д.т.н., профессор кафедры Специальных устройств и технологий ФГБОУ ВПО «СГГА». E-mail: [nerah@rambler.ru](mailto:nerah@rambler.ru)



**Рашид Идрисович Отиениязов** - Старший научный исследователь кафедры «Компьютерные системы» Ташкентской университет информационных технологий. Автор более 17 научных работ. Область научных интересов: ГИС технологии, математическое моделирование, программирование. E-mail: [teniyazov.rashid@mail.ru](mailto:teniyazov.rashid@mail.ru)

#### REFERENCES

- [1] Usmanov R.N., Abdullaev B.D., Mavlonov A.A. Integracija gibridnyh nejronnyh setej dlja issledovaniya gidrohimičeskogo rezhima vodozaborov podzemnyh vod. Geologija i mineral'nye resursy. – 2011. - № 4. – p.39-43.
- [2] D'jakonov V., Kruglov V. Matematicheskie pakety rasshirenija MATLAB. Special'nyj spravocnik. – SPb.: Piter, 2001. – 480 p.: il.
- [3] Rotshtejn A.P., Mitjushkin Ju.I. identifikacija nelinejnyh zavisimostej nejronnymi setjami. Problemy bioniki. – 1998. - №49. – p. 168-174.
- [4] Leonenkov A.V. Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB i fuzzyTECH. SPb.: BHV-Peterburg, 2005. – 756s.
- [5] Korchak T.V. Metody analiza i prognozirovanija vremennyh rjadov s propushennymi dannymi pri ispol'zovanii nejro-nechetkih modelej tipa Takagi-Sugeno i adaptivnyh modelej. Sistemy upravlenija i navigacii, 2009, vyp4(12). – p.90-94.
- [6] Kovalenko A.V., Urtenov M.H. Nejroseteivo modelirovanie infljaccii v Rossii. Nauchnyj zhurnal KubGAU, №61(07), 2010.

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

## Содержание раздела:

- Жмудь В.А., Трубин И.В., Трубин М.В. Проектирование сенсорных кнопок на базе микросхемы ТТР-224. ФГБОУ ВПО НГТУ, (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 70–74.
- Федоров Д.С., Ивойлов А.Ю., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Использование измерительной системы MPU 6050 для определения угловых скоростей и линейных ускорений. ФГБОУ ВПО НГТУ, (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 75–80.
- Воскобойников Ю.Е. Двухэтапный квазиоптимальный алгоритм вейвлет-фильтрации сигналов и изображений. С. 81–89. ФГБОУ ВПО НГТУ, (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11).
- Ласточкин К.Ю., Приходько И.О. Идентификация нелинейной системы прямого нагрева воздуха. ФГБОУ ВПО НГТУ, (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 90–96.
- Гужов В.И., Кабак Е.С., Орлов И.С. Использование модулярной арифметики при фазовых измерениях. ФГБОУ ВПО НГТУ, (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 97–107.

# Проектирование сенсорных кнопок на базе микросхемы ТТР-224

В.А. Жмудь, И.В. Трубин, М.В. Трубин  
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Рассматривается вопрос построения сенсорных кнопок на базе микросхемы ТТР-224. Сенсорные кнопки имеют существенные преимущества перед механическими: более высокая надёжность, больший срок службы, вандалоустойчивость и т.д. Благодаря возможностям микросхемы ТТР-224 можно строить клавиатуры, в которых допускается или не допускается одновременное нажатие на несколько кнопок. Так же можно выбрать режим «кнопка» или режим «переключатель». К микросхеме ТТР-224 можно подключить до 4 кнопок или переключателей. Имеется режим подстройки под «паразитную ёмкость», т. е. если попала соринка или что-то подобное, то через время около 20 с микросхема подстроит свои функции под эту особенность, и можно будет нормально продолжать работать. Так же хочется отметить очень низкое потребление тока - около 3-9 мкА, что соизмеримо с уровнем саморазряда батареи. Таким образом, в автономных системах с батарейным питанием можно не ставить выключатель питания. Рабочий температурный диапазон от минус 40 °С позволяет создавать на базе данной микросхемы системы, работающие вне помещений. С точки зрения формирования выходных сигналов также наблюдается многообразие вариантов: а) обычный логический выход; б) открытый сток с «притягиванием» к плюсу; в) открытый сток с «притягиванием» к нулю. Широкий диапазон питания от +2,4 В до +5 В позволяет применять эту микросхему в очень широком спектре устройств.

**Ключевые слова:** Сенсорная кнопка, ёмкостная кнопка, бесконтактная кнопка, ТТР-224.

## ВВЕДЕНИЕ

Не секрет, что одна из частых причин выхода из строя устройства или установки – механические повреждения. Причем, речь идет даже не о поврежденных корпусах, разбитых экранах, трещинах в печатных платах. Поломка может быть еще меньше, например, не работает кнопка. Причин этому может быть много:

залипли или окислились контакты, ослабла пружинка, накопилась пыль, стерлись токопроводящие части контакта, и так далее [1]. Результат один – необходим ремонт. Хорошо, если такое произошло с чем-то не особо важным, например пультом от телевизора (хотя, для кого-то и это покажется очень важным), а если от работы прибора зависит работа предприятия, то это – простой, потеря времени и возможной прибыли. Наличие подвижных деталей, особенно мелких, вносит существенный вклад в увеличение вероятности отказа прибора или сбоя.

Принципиальное отличие сенсорных кнопок от обычных механических заключается в том, что сенсорные кнопки не требуют нажатия, а реагируют на прикосновение. Сенсорные кнопки являются достойной альтернативой классическим механическим кнопкам, так как они герметичны, не подвержены механическим воздействиям и имеют более привлекательный дизайн.

## 1. СЕНСОРНАЯ КНОПКА

В основе принципа работы сенсорной кнопки заложен ёмкостной эффект. Свойствами конденсатора обладают не только специально изготовленные на заводе устройства, но и любые два проводника, разделенные диэлектриком.

На этом и построен принцип работы сенсорных (ёмкостных) кнопок [2]. Принцип работы ёмкостных кнопок основан на измерении величины ёмкости, которую можно оценить по времени ее заряда (Рис. 1). Для этого можно использовать микроконтроллер или специальную микросхему с внешней RC-цепочкой.

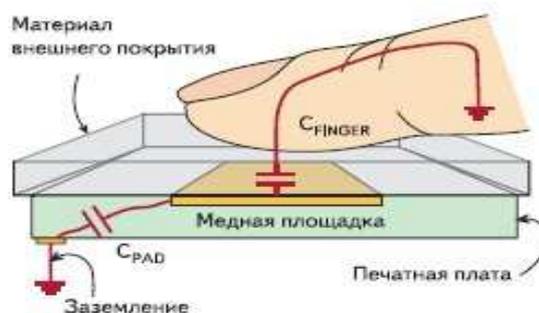


Рис. 1. Принцип работы ёмкостных кнопок

В данном случае электродами являются: медная пластина и человеческий палец, а диэлектриком - материал внешнего покрытия и человеческая кожа. Таким образом, из сочетания этих элементов образуется конденсатор [3]. Управляя режимами работы микросхемы можно вызвать заряд и разряд конденсатора. Контролируя время заряда емкости, можно оценивать ее величину. Чем больше емкость, тем медленнее она будет заряжаться. Поскольку любое проводящее тело обладает емкостью, величина которой зависит от геометрии тела и окружающего его диэлектрика, прикосновение пальца к контактной площадке сенсорной кнопки равносильно подключению к выводу дополнительного конденсатора (Рис. 2).

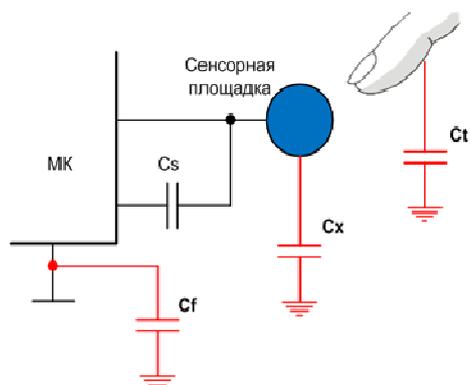


Рис. 2. Схема работы емкостных кнопок

На Рис. 2 применены следующие обозначения:

$C_t$  – емкость тела человека (100..300 пФ);

$C_x$  – емкость сенсора: суммарная емкость проводов, трассировки дорожек на плате (2 – 10 пФ);

$C_s$  – конденсатор – опорный элемент для накопления заряда (22 нФ);

$C_f$  – емкостная связь между схемой и землей (несколько пФ).

Пальцы человека обладают емкостью (как и тело в целом), поэтому при поднесении пальца к сенсору суммарная емкость на входе микроконтроллера увеличивается. При параллельном соединении конденсаторов их емкости складываются [2]. По изменениям заряда, накопленного на  $C_s$  за определенные промежутки времени, можно делать вывод о прикосновении к сенсору. Эту формальную операцию может делать решающее устройство автоматически.

## 2. ХАРАКТЕРИСТИКИ МИКРОСХЕМЫ TTP-224

Для рассмотрения работы емкостных кнопок, возьмем, например, плату с микросхемой TTP-224. Микросхема TTP-224

обладает следующими характеристиками:

- рабочая температура от  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+85^{\circ}\text{C}$ ;
- рабочее напряжение питания от  $+2,4\text{ В}$  до  $+5,5\text{ В}$ ;

- потребляемый ток при питании  $+3\text{ В}$  без нагрузки: в «медленном» режиме  $2,5\text{ мкА}$ , в «быстром» режиме  $9\text{ мкА}$ ;

- при питании  $+3\text{ В}$  время отклика: в «быстром» режиме  $30\text{ мс}$ , в «медленном» режиме  $125\text{ мс}$ ;

- чувствительность может регулироваться в диапазоне емкости от  $1\text{ пФ}$  до  $50\text{ пФ}$  для каждой сенсорной кнопки;

- управление режимами работы («быстрый», «медленный») микросхемы с помощью задания уровней на выводах микросхемы *LPMB pin*);

- четыре входа для сенсорных кнопок;

- четыре программируемых выхода;

- после включения  $0,5\text{ с}$  все функции отключены, проводится калибровка микросхемы;

- постоянная автокалибровка; период калибровки составляет  $4\text{ с}$ .

## 3. СЕНСОРНЫЙ МОДУЛЬ НА БАЗЕ МИКРОСХЕМЫ TTP-224

Внешний вид сенсорного модуля дан на Рис. 3.

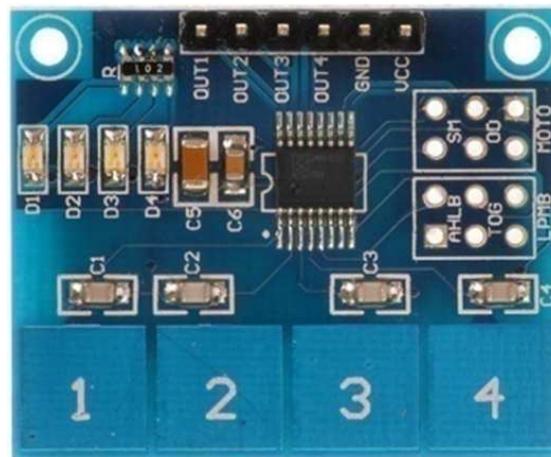


Рис. 3. Сенсорный модуль на базе микросхемы TTP-224

Схема сенсорного модуля на базе микросхемы TTP-224 показана на Рис. 4.

Данный сенсорный модуль имеет следующие режимы работы.

**Режим SM** по умолчанию выставлен в положение «Multi-key mode», что позволяет включать всю группу светодиодов.

При замыкании контактных площадок (Рис. 5) SM выставляется режим «Single key mode» и при прикосновении к сенсорной панели можно зажечь только один светодиод.

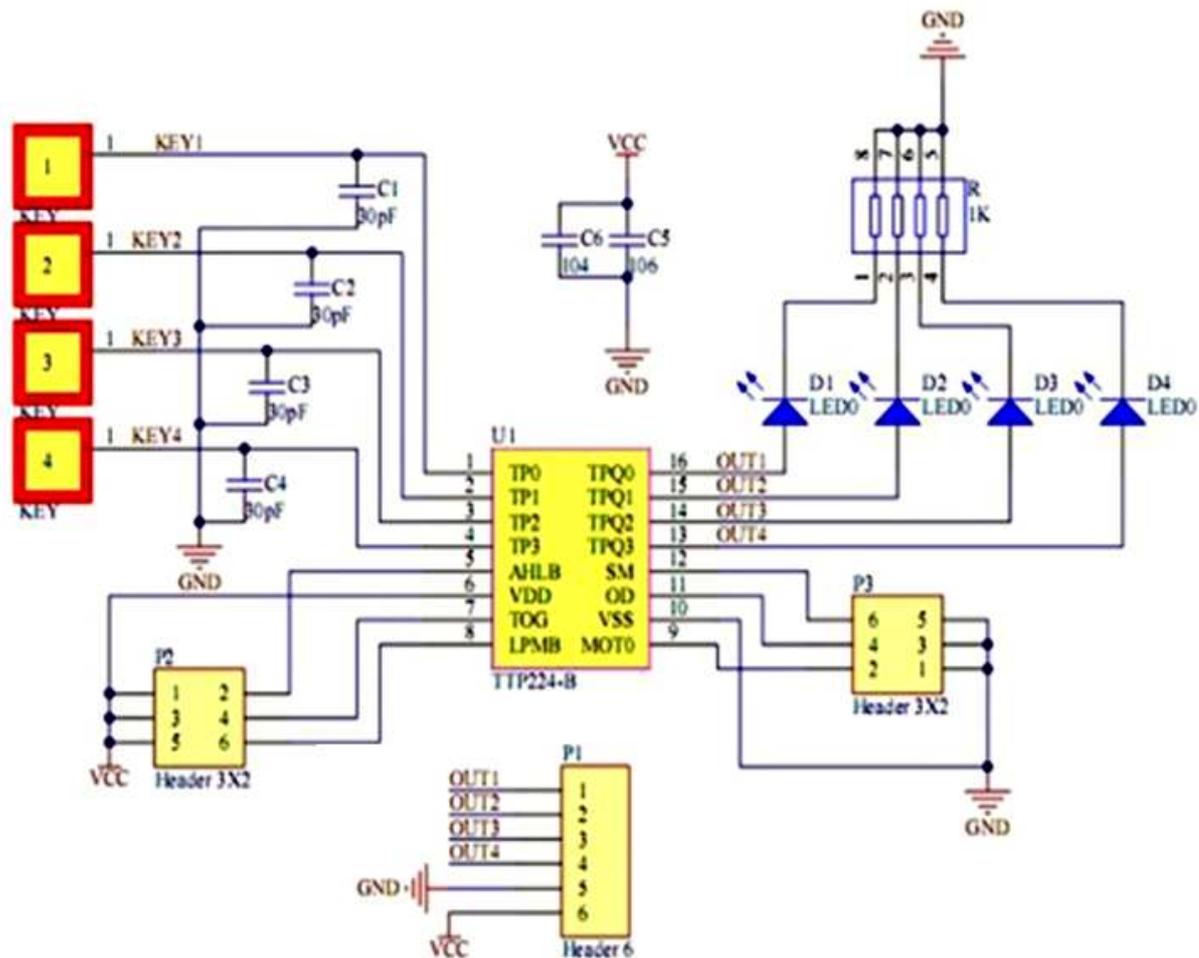


Рис. 4. Схема электрическая принципиальная сенсорного модуля

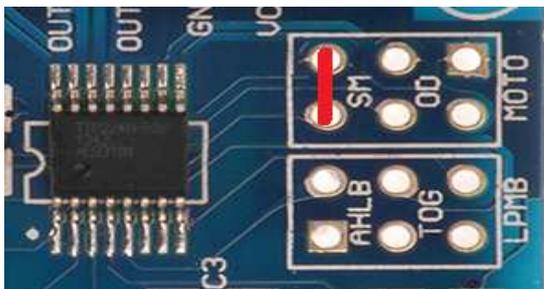


Рис. 5. Контактные площадки SM

Функция *MOTO* предназначена для избежания возникновения «залипания» кнопки при появлении какой-либо паразитной емкости. Данная функция калибрует измерение с сенсорной панели (при контакте около 20 с) и считает полученный сигнал, с учетом увеличения емкости, состоянием «кнопка не нажата». Для срабатывания данной панели потребуется контакт с емкостью большего номинала. При исчезновении паразитной емкости микросхема автоматически калибруется в нормальное состояние через 4 с.

По умолчанию режим *MOTO* отключен; для включения данного режима необходимо замкнуть контактные площадки на плате *MOTO* (Рис. 6).

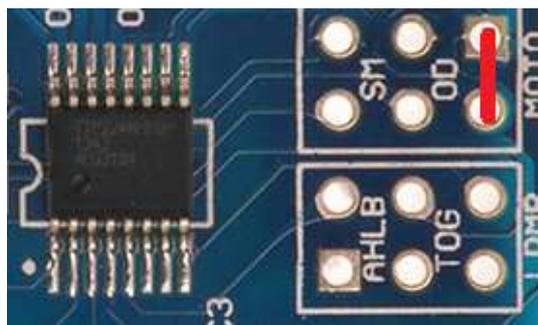


Рис. 6. Контактные площадки MOT0

Режим *LPMB* отвечает за переключение режимов работы с быстрого на медленный. При быстром режиме работы время отклика сенсорной панели составляет 30 мс, при медленном - 125 мс. Если установлен быстрый режим, замкнута переключатель *LPMB* (Рис. 7), то микросхема опрашивает кнопку каждые 125 мс,

а при возникновении нажатия, каждые 30 мс. Если повторного нажатия не происходит в течение 8 с, то микросхема автоматически переходит в медленный режим. Разницу в режимах работы зрительно определить не удалось. По умолчанию на плате установлен медленный режим работы.

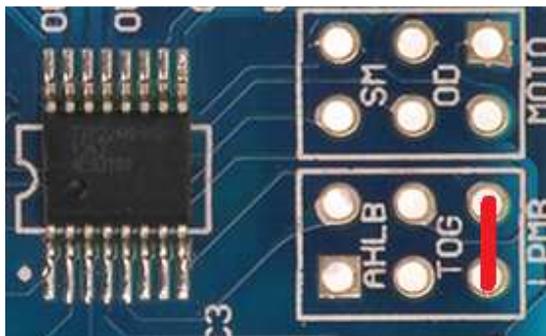


Рис. 7. Контактные площадки LPMB

Также на плате имеются следующие контактные площадки: *AHLB* - по умолчанию разомкнута, *TOG* - по умолчанию разомкнута, *OD* - по умолчанию разомкнута. Ниже в таблице приведены режимы работы (управлять этими режимами можно, замыкая и замыкая контактные площадки на плате), см. *Таблицу*.

Основываясь на данной *Таблице* можно сделать следующие выводы:

Контактные площадки *AHLB* - при их замыкании на выходе микросхемы будет логическая 1.

Контактные площадки *TOG* - при их замыкании микросхема из режима кнопка переходит в режим переключатель.

Контактные площадки *OD* - отвечают за включение режима открытый сток. Притягиваемый к «+» или «0» в зависимости от состояния контакта *AHLB*. Если разомкнута, то притягивается к «+», если замкнута, то к «0».

Также следует отметить, что сенсорная кнопка продолжает работать, даже если ее изолировать пластиком, например, вырезным из тубы. Заключение услов для хранения микросхемы (Рис. 8). Что позволяет расширить применение платы в областях, где требуется механическая защита контактов от внешних повреждений.

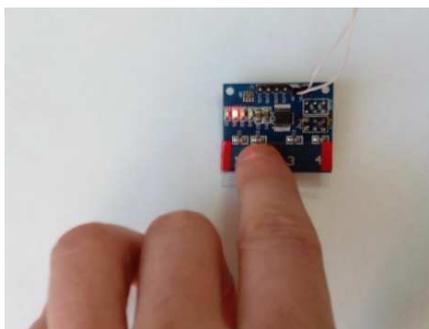


Рис. 8. Работаящая плата с изоляцией сенсоров пластиком

Таблица

TOG	OD	AHLB	Описание режима работы
Разомкнут	Разомкнут	Разомкнут	Светодиод по умолчанию не горит. При прикосновении к сенсорной панели светодиод включается. На выходе микросхемы имеем изменение сигнала при нажатии от логического 0 до логической 1 (данный режим установлен по умолчанию).
Разомкнут	Разомкнут	Замкнут	Светодиод по умолчанию горит. При прикосновении к сенсорной панели светодиод гаснет. На выходе микросхемы имеем изменение сигнала при нажатии от логической 1 до логического 0.
Разомкнут	Замкнут	Разомкнут	Светодиод по умолчанию не горит. При прикосновении к сенсорной панели светодиод включается. На выходе микросхемы открытый сток, притягивающийся к «+». Имеем изменение сигнала при нажатии от логического 0 до логической 1.
Разомкнут	Замкнут	Замкнут	Светодиод по умолчанию не горит. При прикосновении к сенсорной панели светодиод не включается. На выходе микросхемы открытый сток, притягивающийся к 0.
Замкнут	Разомкнут	Разомкнут	Светодиод по умолчанию не горит. При прикосновении к сенсорной панели, светодиод включается. На выходе микросхемы имеем изменение сигнала при нажатии от логического 0 до логической 1. Светодиод продолжает быть включенным до повторного нажатия.
Замкнут	Разомкнут	Замкнут	Светодиод по умолчанию горит. При прикосновении к сенсорной панели светодиод отключается. На выходе микросхемы имеем изменение сигнала при нажатии от логической 1 до логического 0. Светодиод продолжает быть выключенным до повторного нажатия.
Замкнут	Замкнут	Разомкнут	Светодиод по умолчанию не горит. При прикосновении к сенсорной панели светодиод включается. На выходе микросхемы открытый сток, притягивающийся к «+». Имеем изменение сигнала при нажатии от логического 0 до логической 1. Светодиод продолжает быть включенным до повторного нажатия.
Замкнут	Замкнут	Замкнут	Светодиод по умолчанию не горит. При прикосновении к сенсорной панели светодиод не включается. На выходе микросхемы открытый сток, притягивающийся к 0.

## ВЫВОДЫ

Сенсорные кнопки получают всю большую популярность в области электроники, их использование обосновано большим функционалом, долгим сроком службы,

отсутствием механических деталей, что повышает надежность всей системы в целом. Применение сенсорных кнопок для управления различными объектами позволяет не только заметно повысить надёжность самих устройств, но и сделать работу с ними более удобной и комфортной. Отсутствие механических частей способствует увеличению срока службы. При этом существенно упрощаются операции сборки и установки клавиатуры. Кроме того, сенсорные кнопки, как правило, имеют меньшие размеры, что позволяет сократить габариты устройства. Отдельно стоит отметить достоинства применения сенсорных кнопок в промышленной аппаратуре и при тяжёлых условиях эксплуатации, т.к. изготовление клавиатуры, защищённой от влаги и агрессивных сред, представляет собой достаточно сложную задачу.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Новости электроники 2011 год № 9.
- [2] Capacitive mTouch Sensing Solutions: Design Guidelines. URL: <http://www.microchip.com/webinars.microchip.com/WebinarDetails.aspx?dDocName=en542979>
- [3] URL: <http://elektrik.info/main/fakty/781-kondensatory-v-elektricheskikh-i-elektronnyh-shemah.html>



**Вадим Аркадьевич Жмуд** – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.  
E-mail: [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@bk.ru)



**Трубин Максим Витальевич** – студент кафедры Автоматики НГТУ.  
E-mail: [Morkai@bk.ru](mailto:Morkai@bk.ru)



**Трубин Игорь Витальевич** – зам. дир. "КБ Автоматика"  
E-mail: [tiv.kba@gmail.com](mailto:tiv.kba@gmail.com)

## Designing of Touch-Sensing Buttons on the Base of Chip TTP-224

V.A. ZHMUD, M.V. TRUBIN, I.V. TRUBIN

*Abstract:* The paper discusses the construction of the touch buttons on the base chip TTP-224. Touch buttons have significant advantages over mechanical ones. These are higher reliability, longer life, vandal resistance, etc. With the power of the chip TTP-224 one can build a keyboard, in which simultaneous pressing a few buttons is allowed or not allowed. You can also select mode "button" or "switch". You can connect up to four buttons and switches to the chip TP-224. There is a mode of adjustment to the "stray capacitance", i. e. if you got a mote, or something like that, then after about 20 s the chip will adjust its functions accordingly to this feature and you can continue to work normally. It is also worthing of mentioning the very low current consumption, about 3–9 mA, which is comparable with the level of self-discharge of the battery. Thus, in a self-contained battery powered systems one can avoid the use of the power switch. Operating temperature range is from -40°C. It allows you to create systems operating outdoors based on this chip. From the point of view of the formation of the output signals the variety of options also exists: a) normal logical output; b) open drain with "attraction" to positive power supply; c) open drain with "attraction" to zero. Wide range of power supply from +2.4 V to +5 V allows you to use this chip in a very wide range of devices.

*Keywords:* Touch button, capacitive buttons, contactless button, TTP-224.

## REFERENCES

- [1] News of electronics (In Russian) 2011, № 9.
- [2] Capacitive mTouch Sensing Solutions: Design Guidelines. URL: <http://www.microchip.com/webinars.microchip.com/WebinarDetails.aspx?dDocName=en542979>
- [3] URL: <http://elektrik.info/main/fakty/781-kondensatory-v-elektricheskikh-i-elektronnyh-shemah.html>

# Использование измерительной системы MPU 6050 для определения угловых скоростей и линейных ускорений

Д.С. Федоров, А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин  
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В настоящее время широкое распространение получили микроэлектромеханические системы (МЭМС). Типичными примерами МЭМС являются акселерометры и гироскопы. В данной статье рассматриваются особенности работы МЭМС гироскопа, являющегося частью измерительной системы MPU6050, и получения данных с датчиков нее. Данная система обладает цифровым интерфейсом I<sup>2</sup>C. Для работы с MPU6050 была использована отладочная плата STM32VLDISCOVERY с установленным на ней микроконтроллером STM32F100RBT6B. Система MPU6050 подключена к I<sup>2</sup>C-модулю микроконтроллера. Датчик является ведомым устройством, а микроконтроллер – ведущим. Работа с датчиком осуществляется путем записи данных в управляющие регистры и считывания данных из информационных регистров. Запрос на запись или чтение данных инициируется микроконтроллером. По стандарту интерфейса I<sup>2</sup>C любой обмен данными включает следующие этапы: генерация старт-условия ведущим устройством, отправка адреса ведомого устройства, считывание данных из ведомого устройства или запись в него, генерация ведущим устройством условия остановки. В целом, подключение устройств к шине I<sup>2</sup>C является стандартной задачей в инженерии, однако иногда трудности все же возникают. Связано это, как правило, с особенностями реализации I<sup>2</sup>C интерфейса на конкретном устройстве. Например, в случае с микроконтроллером STM32F100RBT6B особенность работы I<sup>2</sup>C состоит в том, что при считывании генерировать условие остановки необходимо не после приема последнего байта, как следует из логики работы I<sup>2</sup>C, а перед ним. Тогда микроконтроллер выставит условие остановки в нужный момент, иначе произойдет зависание линии. После отладки связи с MPU6050 по I<sup>2</sup>C были произведены измерения ускорения и угловой скорости датчика. Эти данные были использованы для определения угла наклона. Данные акселерометра имели существенные выбросы и искажения, связанные с действием боковых ускорений. Данные гироскопа так же имеют существенный недостаток: угловая скорость после остановки гироскопа не равна нулю, а имеет некоторое смещение. Как

следствие – постепенное «уплывание» угла после интегрирования угловой скорости. Таким образом, отдельно друг от друга акселерометр или гироскоп не может быть использован для получения угла наклона. Для получения корректных данных необходимо применять специальные фильтры и использовать данные обоих датчиков.

**Ключевые слова:** гироскоп, акселерометр MPU6050, STM32, STM32F100RBT6B.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время широкое распространение получили микроэлектромеханические системы (МЭМС). Это стало возможным благодаря их миниатюрности, большой функциональности, высокой надежности, низкого энергопотребления и невысокой стоимости.

Типичными примерами МЭМС являются акселерометры и гироскопы, которые есть в каждом смартфоне, планшетном компьютере и т.д. Первые используются для измерения линейных ускорений, а вторые – угловых скоростей. Совместное использование акселерометра и гироскопа позволяет определить движение тела в трехмерном пространстве.

В данной статье будут рассмотрены особенности работы МЭМС гироскопа, являющегося частью MPU6050 и получения данных с датчиков этой измерительной системы.

## 1. ПРИНЦИП РАБОТЫ ГИРОСКОПА

МЭМС устройства изготавливают на кремниевой подложке аналогично технологии производства однокристалльных интегральных микросхем, поэтому их размеры варьируются от нескольких десятков микрон до нескольких миллиметров.

Существует несколько разновидностей МЭМС гироскопов, различающихся внутренним устройством, но всех их объединяет то, что их работа основана на использовании силы Кориолиса. В каждом из них есть рабочее тело, совершающее возвратно-поступательные движения. Если вращать подложку, на которой находится это тело, то на него начнет действовать сила Кориолиса, направленная перпендикулярно оси вращения и направлению движения тела. На Рис. 1 представлен механизм работы этой силы.

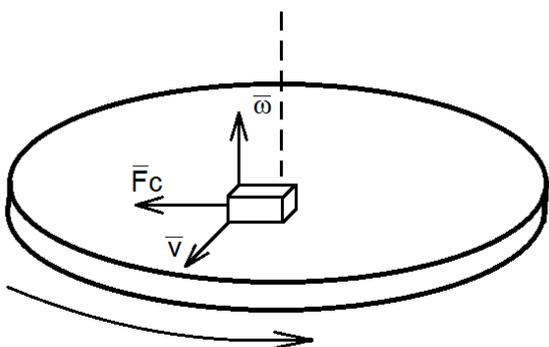


Рис. 1. Механизм работы силы Кориолиса:  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости,  $\vec{v}$  – вектор линейной скорости,  $\vec{F}_C$  – сила Кориолиса

Зная линейную скорость и силу Кориолиса можно определить угловую скорость.

Одна из возможных реализаций гироскопа имеет следующую структуру: закрепленная на гибких подвесках рамка, внутри которой совершает поступательные колебательные движения некая масса [1]. Структура такого сенсора представлена на Рис.2.

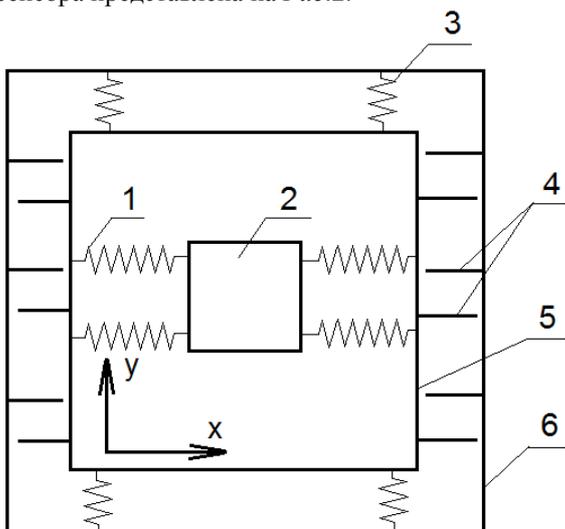


Рис. 2. Внутренняя структура гироскопа: 1 – крепление массы, 2 – рабочая масса, 3 – крепление внутренней рамки, 4 – сенсоры перемещения внутренней рамки, 5 – внутренняя рамка, 6 - подложка

Колебания рабочей массы происходят вдоль оси X и генерируются электростатически, а колебания внутренней рамки возможны только вдоль оси Y. Между внутренней рамкой и подложкой расположены обкладки плоских конденсаторов (сенсоры перемещения), таким образом, измеряя их емкость, можно фиксировать движение рамки относительно подложки.

На Рис. 3 представлена структура гироскопа при его вращении в плоскости XY по часовой стрелке.

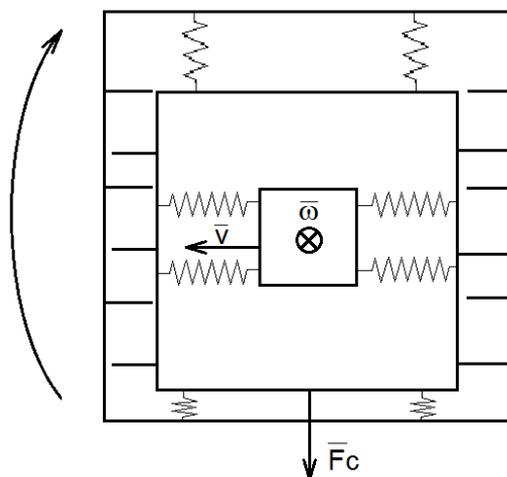


Рис. 3. Структура гироскопа при вращении:  $\vec{\omega}$  – вектор угловой скорости,  $\vec{v}$  – вектор линейной скорости,  $\vec{F}_C$  – сила Кориолиса

Но колебания внутренней рамки могут вызываться не только силой Кориолиса, но и линейными ускорениями, которые действуют вдоль оси Y. Проблема решается путем размещения на одной подложке двух рамок, в каждой из которых находится рабочая масса. Обе массы колеблются в противофазе, следовательно, в конкретный момент времени сила Кориолиса, воздействующая на первую массу, направлена противоположно силе, воздействующей на вторую. Сигналы, генерируемые силой Кориолиса, будут складываться, а синфазная составляющая, порожденная линейным ускорением, – вычитаться.

Ниже представлены технические характеристики MPU 6050 и встроенного гироскопа [2].

## 2. ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДУЛЯ MPU 6050 И ГИРОСКОПА

### 2.1. Технические характеристики модуля:

- 3-х осевой гироскоп;
- 3-х осевой акселерометр;
- Термодатчик;
- Напряжение питания 2.375V-3.46V;
- FIFO-буфер объемом 1024 байт;
- Программируемые пользователем цифровые фильтры для гироскопа, акселерометра и термодатчика;
- Интерфейс I2C для записи и чтения регистров устройства, работающий на частоте до 400кГц.

### 2.2. Технические характеристики гироскопа:

- Программируемый пользователем диапазон измерений:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,

- ±1000, и ±2000 °/с;
- Встроенный 16-разрядный АЦП;
- Цифровой программируемый ФНЧ;
- Ток в режиме работы – 3,6 мА;
- Ток в режиме ожидания 5 мкА.

### 3. ПОЛУЧЕНИЕ ИЗМЕРЕННЫХ ДАННЫХ

Модуль MPU 6050 был подключен к  $I^2C$  модулю микроконтроллера STM32F100RBT6B для отправки команд и считывания из регистров необходимых данных. После отправки модулю команды о начале измерений происходит постоянная оцифровка показаний со всех осей гироскопа, акселерометра и термодатчика. Остается только считывать байты из необходимых регистров. Частота записи новых данных в эти регистры аналогово-цифровым преобразователем зависит от выбранной пользователем чувствительности сенсора и, следовательно, диапазона измерений.

Подключение датчика к микроконтроллеру осуществляется по интерфейсу  $I^2C$ . Данный интерфейс обладает рядом особенностей: имеет архитектуру ведущий – ведомый, то есть одно устройство (ведущее) производит запрос на чтение или запись ведомых устройств. В нашем случае ведомым является MPU 6050, а ведущим  $I^2C$  модуль, находящийся на микроконтроллере. Для связи используется две двунаправленные линии: тактирования и данных. Ведомое устройство имеет свой адрес, который на данной линии должен быть уникальным (в нашем случае это 0x00). Линии должны быть подтянуты к уровню логической единицы. Как правило, устройства подключаются к линиям через выводы с открытым коллектором (стоком). Фактически, устройства подключены по схеме «монтажное И». Преимуществом является возможность подключения большого количества ведомых устройств, а также сравнительно высокая дальность передачи данных. Но при увеличении дальности фактическая скорость передачи данных снижается. Это связано с тем, что фронты сглаживаются из-за увеличения емкости проводов.

На Рис. 4 представлен алгоритм программы, осуществляющей считывание данных из регистров MPU 6050. Она составлена с учетом особенностей протокола для датчика и контроллера.

Стоит обратить внимание на некоторые особенности, связанные с работой этого алгоритма. Во-первых, необходимость чтения регистра SR2 там, где это указано в блок-схеме. Считывание содержимого этого регистра приводит к сбросу некоторых битов-флагов в нем.

Если этого не сделать, модуль MPU 6050 не сможет перейти к следующей стадии работы и произойдет зависание программы. Вторая особенность связана с завершением сеанса связи при чтении данных из регистров MPU 6050. Сигналом завершения обмена данными является установка стоп-условия на линии данных. В случае с микроконтроллером STM32F100 команду на генерацию стоп-условия для него необходимо отдать *после прочтения предпоследнего байта*. В случае если принимается один байт, то после получения подтверждения принятия адреса от ведомого устройства. Если это сделать после прочтения последнего байта, микроконтроллер будет ожидать прием еще одного байта, которого не будет, и программа зависнет.

На блок-схеме представлен алгоритм для чтения или записи одного байта, однако он легко может быть дополнен для прочтения или записи нескольких байт. После чтения или записи в регистр, MPU6050 автоматически увеличивает адрес регистра на один, что позволяет за один сеанс связи считывать или записывать данные в несколько регистров подряд.

### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Считывание данных из регистров датчика производилось с периодичностью 10 раз в секунду. Показания гироскопа интегрировались микроконтроллером для определения угловых скоростей относительно всех трех осей. Результаты представлены на Рис. 5–7. На Рис. 7 видно, как вследствие интегрирования происходило накопление ошибки, так называемый дрейф нуля: датчик находится в неподвижном состоянии, а значение угла увеличивается с одной и той же скоростью. На Рис. 5 видно, что показания акселерометра зашумлены высокочастотной помехой, что приведет к ошибкам при вычислении углов отклонения путем использования обратных тригонометрических функций.

Таким образом, MPU 6050 является функциональной измерительной системой, включающей в себя гироскоп и акселерометр, которые позволяют отследить движение тела в пространстве: определить угловую скорость и линейные ускорения. Определение угла путем интегрирования угловой скорости является неточным из-за накопления ошибки (низкочастотный шум). Акселерометр же вносит высокочастотную помеху. Решением является использование данных с обоих датчиков и обработка их альфа-бета фильтром или фильтром Калмана. При этом будут устранены недостатки акселерометра и гироскопа.

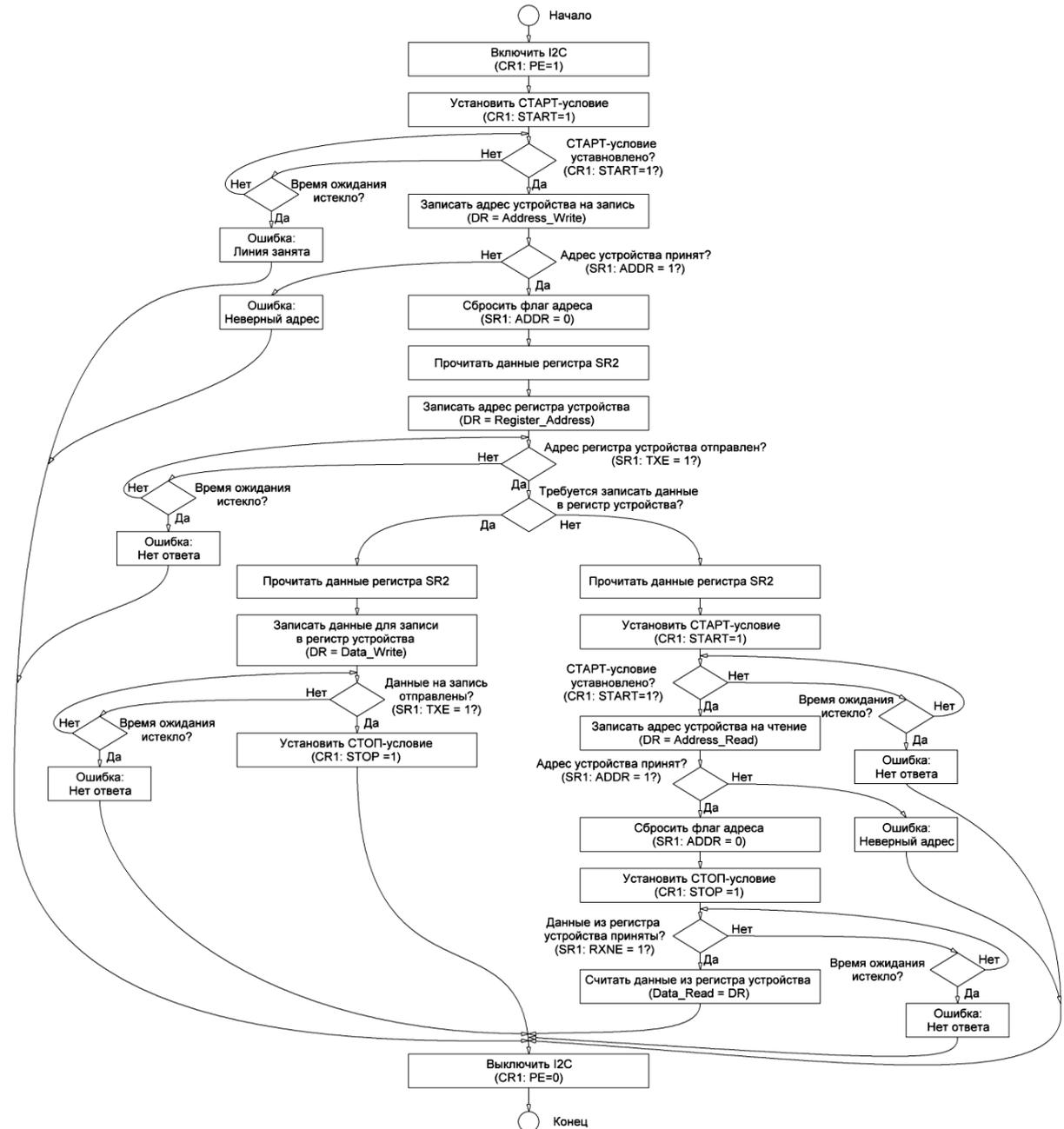


Рис. 4. Блок-схема алгоритма записи и считывания данных из регистров MPU6050.

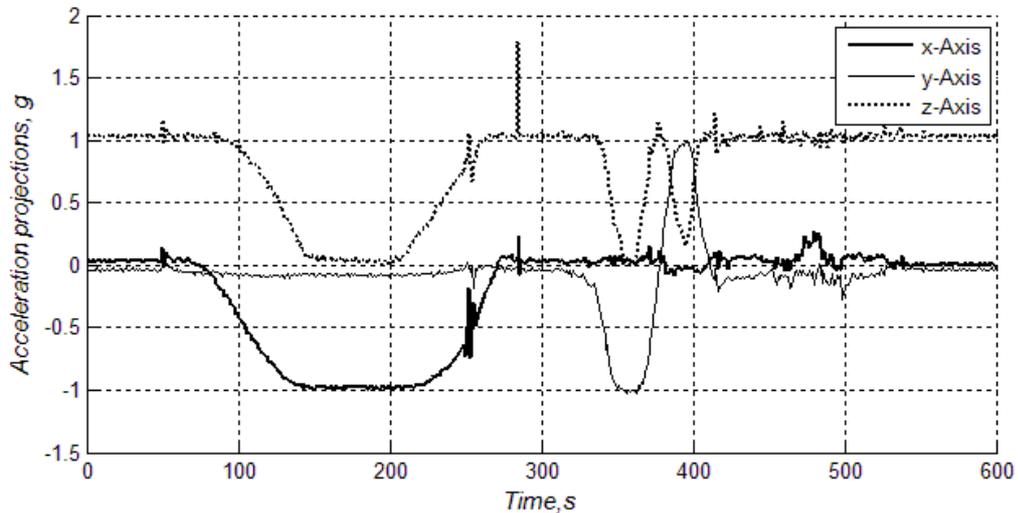


Рис. 5. Показания по осям акселерометра

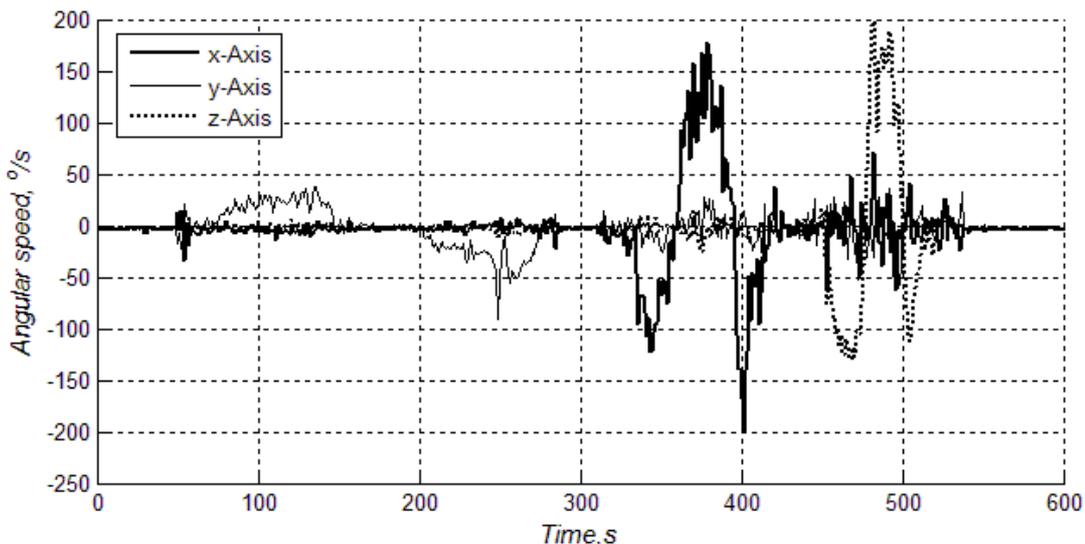


Рис. 6. Показания по осям гироскопа

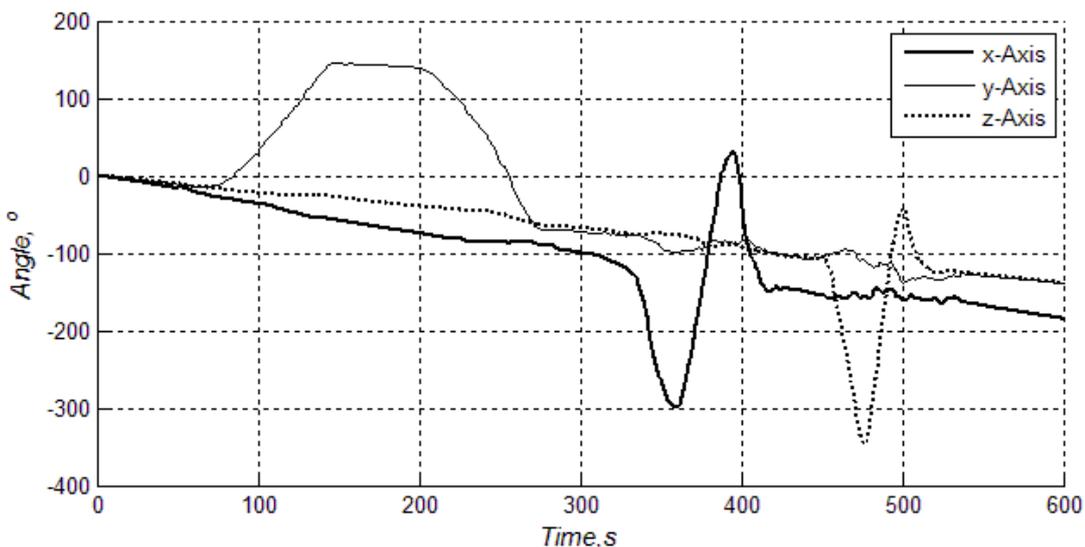


Рис. 7. Данные об углах поворота, полученные интегрированием показаний гироскопа

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России по государственному заданию №2014/138, тема проекта «Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] МЭМС-гироскопы – единство выбора [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.electronics.ru/journal/article/512>
- [2] MPU-6050 Datasheet (PDF) - List of Unclassified Manufacturers [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/517744/ETC1/MPU-6050.html>



**Федоров Дмитрий Сергеевич**  
Магистрант кафедры Автоматики факультета АВТ НГТУ  
E-mail: [fds0303@mail.ru](mailto:fds0303@mail.ru)



**Ивойлов Андрей Юрьевич** - магистрант кафедры Автоматики факультета АВТ НГТУ  
E-mail: [iau13hv@mail.ru](mailto:iau13hv@mail.ru)



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



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

### **Using of Measuring System MPU6050 for the Determination of the Angular Velocities and Linear Accelerations**

**D.S. FEDOROV, A.Y. IVOYLOV,  
V.A. ZHMUD, V.G. TRUBIN**

*Abstract:* At present, the micro-electro-mechanical systems (MEMS) are widely used. Typical examples of MEMS are accelerometers and gyroscopes. This paper discusses the features of MEMS-gyroscope, which is part of the measuring system MPU6050. It also discusses the receiving of the data from its sensors. This system has a digital interface I<sup>2</sup>C. Work with MPU6050 demands the use of STM32VLDISCOVERY evaluating board with microcontroller STM32F100RBT6B stated on it. System MPU6050 is connected to the I<sup>2</sup>C-module of the microcontroller. The sensor is a slave and microcontroller is master. The work with the sensor is the recording of the data into controlling registers or reading of the data from the information register. The microcontroller initiates the request to read or write of the data. According the standard I<sup>2</sup>C interface, any communication involves the following steps: generation of start-conditions by the master; sending of the address of the slave device; reading data from the slave or write to it; the generation by the master device of the stop condition. In general,

the connection of devices to the I<sup>2</sup>C bus is a standard problem in engineering, but sometimes problems do occur. This is typically due to implement features of I<sup>2</sup>C interface at the specific device. For example, with the microcontroller STM32F100RBT6B the specific of the operation of I<sup>2</sup>C is that when reading it is necessary generate the stop condition is necessary not after receiving the last byte, as it follows from the logic of the I<sup>2</sup>C working, but before it. Then the microcontroller will put a stop condition signal at the right time, otherwise the line will hang. After debugging of connection with MPU6050 on the I<sup>2</sup>C measurements of acceleration and angular velocity of the sensor were made. These data were used to determine the angle of inclination. Accelerometer data had significant emissions and distortion due to the influence of lateral acceleration. These data of gyroscope as well has a significant disadvantage: after stopping the angular velocity of the gyroscope is not zero, but has some displacement. Therefore, there is gradual drift of angle after integrating of the angular velocity. Thus, the accelerometer or the gyroscope separately from each other cannot be used to obtain the inclination angle. To obtain the correct data it is necessary to use special filters and to use the data of th both sensors.

*Keywords:* gyroscope, accelerometer MPU6050, STM32, STM32F100RBT6B.

#### **REFERENCES**

- [1] MEMS-giroskopy – edinstvo vybora (In Russian) [Electronic resurs]. – URL: <http://www.electronics.ru/journal/article/512>
- [2] MPU-6050 Datasheet (PDF) - List of Unclassified Manufacturers [Electronic resurs]. – URL: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/517744/ETC1/MPU-6050.html>

УДК 519.2

# Двухэтапный квазиоптимальный алгоритм вейвлет-фильтрации сигналов и изображений

Ю.Е. Воскобойников

ФГБОУ ВПО НГАСУ (Сибстрин), Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В работе рассматривается построение квазиоптимального алгоритма, по структуре аналогичного винеровскому оптимальному алгоритму. В предлагаемом алгоритме оценивание неизвестного отношения «шум/сигнал» для каждого коэффициента осуществляется на втором этапе по сигналу, полученного на первом этапе с использованием пороговых алгоритмов вейвлет-фильтрации. Показано, что при выборе пороговых величин по критерию оптимальности ошибка фильтрации таким алгоритмом значительно уменьшается по сравнению с традиционными алгоритмами вейвлет-фильтрации.

**Ключевые слова:** алгоритмы вейвлет-фильтрации, оптимальные алгоритмы, квазиоптимальные алгоритмы, двухэтапные алгоритмы вейвлет-фильтрации.

## ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия для фильтрации сигналов и изображений широко используется их разложение в базисе вейвлет-функций. В этом случае фильтрация включает три этапа:

- вычисление прямого дискретного вейвлет-преобразования (нахождение коэффициентов разложения по зашумленным значениям дискретного сигнала);
- обработка «зашумленных» коэффициентов разложения (устранение шумовой составляющей);
- вычисление обратного дискретного вейвлет-преобразования (нахождение «сглаженных» значений дискретной функции).

Совокупность этих трех этапов будем называть *вейвлет-фильтрацией*, и она относится к алгоритмам фильтрации в частотной области – обработке подвергаются коэффициенты разложения зашумленного сигнала по некоторой системе базисных функций. Очевидно, что качество фильтрации зашумленного сигнала определяется алгоритмами обработки второго этапа, где строятся оценки для неизвестных «точных» коэффициентов разложения. Большинство

используемых алгоритмов носят пороговый характер: коэффициент разложения меньше по абсолютной величине некоторой пороговой величины зануляется, в противном случае коэффициент сохраняется или подвергается некоторому (в общем случае нелинейному) преобразованию. Распространение на практике получили «жесткая» и «мягкая» пороговые функции, зависящие только от одного параметра – величина порога. При этом выбор пороговой величины существенно влияет на ошибку фильтрации и эта величина, по сути, является управляющим параметром алгоритмов вейвлет – фильтрации [1-3].

Пороговые алгоритмы фильтрации имеют существенный недостаток: в то время, когда в оптимальном (винеровском) алгоритме фильтрации для каждого коэффициента разложения определяется свой фильтрующий множитель, зависящий от отношения «шум/сигнал» для этого коэффициента разложения, в пороговых алгоритмах вычисляется одна пороговая величина либо для всех коэффициентов разложения конкретного уровня, либо для всех коэффициентов разложения. Очевидно, что приближение, использующее пороговые оценки коэффициентов разложения будет иметь ошибку фильтрации больше (иногда в разы) минимальной ошибки винеровского алгоритма. К сожалению, винеровский алгоритм фильтрации требует априорной информации о коэффициентах разложения «точной» (не зашумленной) функции, которая на практике недоступна.

Поэтому в данной работе рассматривается задача построения алгоритма вейвлет-фильтрации, реализуемого на практике, но имеющего СКО незначительно превышающего СКО винеровского алгоритма фильтрации (не более чем на 10 %).

## 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МЕТОДА

**Оптимальный алгоритм оценивания коэффициентов вейвлет-разложения.** Удобной формой вейвлет – представления является многомасштабное (multiresolution) представление вида [4-5]:

$$\hat{f}(t) = \sum_k a_{j_0+J,k} \varphi_{j_0+J,k}(t) + \sum_{j=j_0+1}^{j_0+J} \sum_k d_{j,k} \psi_{j,k}(t), \quad (5)$$

которое можно интерпретировать как восстановление исходного сигнала  $f(t)$  по его коэффициентам разложения на  $J$ -ом уровне. Функции  $\{\varphi_{j,k}(t)\}$  называют масштабирующими (или отцовскими), а функции  $\{\psi_{j,k}(t)\}$  - вейвлет - функциями (или материнскими). Коэффициенты разложения  $a_{j,k}$  называют аппроксимирующими,  $d_{j,k}$  - детализирующими и они определяются выражениями:

$$a_{j,k} = \int_R f(t) \varphi_{j,k}(t) dt, \quad d_{j,k} = \int_R f(t) \psi_{j,k}(t) dt, \quad (6)$$

где  $R$  - интервал определения функции  $f(t)$ . Переменная  $j$  характеризует уровень разложения и ее часто называют коэффициентом масштаба, а переменная  $k$  - временной сдвиг той или иной базисной функции.

Напомним, что системы функций  $\{\varphi_{j,k}(t)\}$ ,  $\{\psi_{j,k}(t)\}$  составляют ортогональный базис пространств  $V_j, W_j$ ,  $-\infty < j < \infty$ , и определяются соотношениями [2-3]:

$$\varphi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \varphi(2^{-j}t - k), \quad \psi_{j,k}(t) = 2^{-j/2} \psi(2^{-j}t - k),$$

где функции  $\{\varphi(t-k)\}$ ,  $\{\psi(t-k)\}$  - ортогональный базис «нулевых» пространств  $V_0, W_0$ . При этом пространство  $W_j$  ортогонально пространству  $V_j$  и  $V_{j-1} = V_j + W_j$ . Чем меньше номер  $j$ , тем более «мелкие» структуры исходной функции  $f(t)$  могут быть представлены в базисах  $\{\varphi_{j,k}(t)\}$ ,  $\{\psi_{j,k}(t)\}$  и тем ближе реконструированный сигнал  $\hat{f}(t)$  к исходному. Вейвлеты, базисные функции, которых удовлетворяют условиям ортонормированности, называются *ортогональными* и к ним относятся вейвлеты Добеши, Симлета, Кайфлета [4,5]. Ниже рассматриваются только ортогональные вейвлеты.

На практике для вычисления коэффициентов  $a_{j,k}$ ,  $d_{j,k}$  вместо интегрирования (2) используется пирамидальный алгоритм Малла [4-5], требующий порядка  $N$  операций, что делает его очень эффективным инструментом в вейвлет - технологиях. В этом алгоритме порядок вычисления коэффициентов следующий: первоначально (точка старта алгоритма) задаются аппроксимирующие коэффициенты на некотором «нулевом» уровне  $j_0$ :

$$a_{j_0,k}, k = 1, \dots, N.$$

Величина  $N$  удовлетворяет условию  $N = 2^m, m > 1$ . Затем

по этим коэффициентам вычисляются аппроксимирующие и детализирующие коэффициенты вычисляются  $a_{j_0+1,k}$ ,  $d_{j_0+1,k}$ , по коэффициентам  $a_{j_0+1,k}$  находятся  $a_{j_0+2,k}$ ,  $d_{j_0+2,k}$ ; по  $a_{j_0+2,k}$  вычисляются  $a_{j_0+3,k}$ ,  $d_{j_0+3,k}$ . Таким образом, по аппроксимирующим коэффициентам  $a_{j_0+j-1,k}$  определяются коэффициенты  $a_{j_0+j,k}$ ,  $d_{j_0+j,k}$ ,  $j = 1, \dots, J$ ,  $k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2^j}$ . В алгоритме Малла для

вычисления коэффициентов используются суммы небольшого числа слагаемых (число зависит от вида вейвлетов), что позволяет эффективно вычислять интегралы (2) без методических ошибок, присущих квадратурным формулам.

Для задания коэффициентов  $a_{j_0,k}$ ,  $k = 1, \dots, N$ , используется несколько способов. Наиболее частым и простым является задание  $a_{j_0,k} = f(t_k)$ ,  $k = 1, \dots, N$ , где  $f(t_k)$  - значение функции в равноотстоящих узлах сетки. Такое задание означает, что исходная функция  $f(t)$  аппроксимируется функцией

$$s(t) = \sum_{k=1}^N f(t_k) \varphi_{j_0,k}(t).$$

В дальнейшем будем считать, что число узлов сетки выбрано таким образом, что ошибка такой аппроксимации пренебрежимо мала.

Предположим, что значения функции заданы (измерены) в  $N$  узлах  $t_i$  со случайной аддитивной погрешностью  $\eta_i$  имеющее нулевое среднее и дисперсию  $\sigma^2$ . Это означает, что коэффициенты  $\tilde{a}_{j_0,k}, k = 1, \dots, N$ , задаются с такой же погрешностью и коэффициенты разложения  $\tilde{d}_{j_0+j,k}, \tilde{a}_{j_0+j,k}, j = 1, \dots, J$ , также вычисляются со случайными ошибками. Для упрощения записи уровней разложения в дальнейшем полагаем  $j_0 = 0$ . С учетом этого допущения на  $J$ -ом уровне разложения имеем набор коэффициентов:

$$\{\tilde{d}_{1,k}\}, \{\tilde{d}_{2,k}\}, \dots, \{\tilde{d}_{j,k}\}, \dots, \{\tilde{d}_{J,k}\}, \{\tilde{a}_{J,k}\}, k = 1, 2, \dots, \frac{N}{2^j}, j = 1, \dots, J. \quad (7)$$

По этим коэффициентам вычисляются оценки  $\{\hat{d}_{j,k}\}, \{\hat{a}_{j,k}\}$  для точных коэффициентов  $\{d_{j,k}\}, \{a_{j,k}\}$  и строится «сглаженная» функция  $\hat{f}(t)$  вида (1). Определим среднеквадратическую ошибку (СКО) фильтрации выражением:

$$\Delta(\hat{f}) = M \left[ \int_R (\hat{f}(t) - f(t))^2 dt \right].$$

Учитывая свойства ортонормированности используемых базисных функций, СКО фильтрации можно определить выражением:

$$\Delta(\hat{f}) = M \left[ \sum_k (\hat{a}_{j,k} - a_{j,k})^2 \right] + M \left[ \sum_{j=1}^J \sum_k (\hat{d}_{j,k} - d_{j,k})^2 \right]. \quad (5)$$

Величины  $\hat{a}_{j,k}$ ,  $\hat{d}_{j,k}$ , доставляющие минимум функционалу  $\Delta(\hat{f})$ , назовем *оптимальными оценками* коэффициентов вейвлет-разложения. Оптимальные оценки будем искать в виде:

$$\hat{a}_{j,k} = \omega_{j,k}^a \cdot \tilde{a}_{j,k}, \quad \hat{d}_{j,k} = \omega_{j,k}^d \cdot \tilde{d}_{j,k}. \quad (6)$$

Из необходимых и достаточных условий минимума  $\Delta(\hat{f})$  получаем оптимальные множители [2,3]:

$$\omega_{opt,j,k}^a = \frac{1}{1 + S_{j,k}^a}; \quad \omega_{opt,j,k}^d = \frac{1}{1 + S_{j,k}^d}, \quad (7)$$

и оптимальные оценки:

$$\hat{a}_{opt,j,k} = \frac{1}{1 + S_{j,k}^a} \tilde{a}_{j,k}; \quad \hat{d}_{opt,j,k} = \frac{1}{1 + S_{j,k}^d} \tilde{d}_{j,k}, \quad (8)$$

где отношения  $S_{j,k}^a = \frac{\sigma^2}{a_{j,k}^2}$ ;  $S_{j,k}^d = \frac{\sigma^2}{d_{j,k}^2}$

можно трактовать как *отношение «шум/сигнала»* соответствующего коэффициента разложения. Можно показать, что СКО  $\Delta(\hat{f})$  при оптимальных множителях (7) определяется выражением:

$$\Delta(\hat{f}_{opt}) = \sum_k \frac{S_{j,k}^a}{1 + S_{j,k}^a} \cdot a_{j,k}^2 + \sum_{j=1}^J \sum_k \frac{S_{j,k}^d}{1 + S_{j,k}^d} \cdot d_{j,k}^2, \quad (9)$$

из которого видно, что при достаточно малых  $\sigma^2$  величина  $\Delta(\hat{f}_{opt})$  имеет порядок  $\sigma^2$ , т.е.

$\Delta(\hat{f}_{opt}) \sim \sigma^2$ . В дальнейшем алгоритм вейвлет-фильтрации с коэффициентами разложения (8) будем называть *оптимальным* или *винеровским* алгоритмом.

Для удобства дальнейшего изложения введем:

- вектор «точных» коэффициентов, вычисленных по не зашумленным значениям функции

$$\theta = \left| d_{j_0+1,k} : d_{j_0+2,k} : \dots : d_{j_0+J,k} : a_{j_0+J,k} \right|^T;$$

- вектор «зашумленных» коэффициентов, вычисленных по зашумленным значениям функции

$$\tilde{\theta} = \left| \tilde{d}_{j_0+1,k} : \tilde{d}_{j_0+2,k} : \dots : \tilde{d}_{j_0+J,k} : \tilde{a}_{j_0+J,k} \right|^T.$$

При этом  $i$ -ую проекцию этих векторов будем

обозначать как:  $\theta(i)$ ,  $\tilde{\theta}(i)$ .

(8) Тогда выражения (8), (9) можно переписать в виде:

$$\hat{\theta}_{opt}(i) = \frac{1}{1 + S(i)} \tilde{\theta}(i) = \frac{\theta^2(i)}{\theta^2(i) + \sigma^2} \tilde{\theta}(i); \quad (10)$$

$$\Delta(\hat{f}_{opt}) = \sum_i \frac{S(i)}{1 + S(i)} \theta^2(i) = \sum_i \frac{\sigma^2}{\theta^2(i) + \sigma^2} \theta^2(i), \quad (11)$$

где

$$S(i) = \frac{\sigma^2}{\theta^2(i)} \quad (12)$$

- отношение «шум/сигнал», которое имеет следующий предел:

$$\lim S(i) = \infty, \text{ если } \sigma^2 \rightarrow \infty \text{ или } \theta(i) \rightarrow 0. \quad (13)$$

При этом оптимальный фильтрующий множитель

$$\omega_{opt}(i) = \frac{1}{1 + S(i)} = \frac{\theta^2(i)}{\theta^2(i) + \sigma^2} \quad (14)$$

имеет предел:

$$\lim_{S(i) \rightarrow \infty} \omega_{opt}(i) = 0. \quad (15)$$

В матричном виде оптимальный алгоритм можно записать в виде:

$$\hat{f}_{opt} = W^{-1} \Omega_{opt} W \tilde{f}, \quad (16)$$

Где  $W, W^{-1}$  - матричные обозначения прямого и обратного дискретного вейвлет-преобразования,  $\Omega_{opt} = \text{diag} \{ \omega_{opt}(1), \omega_{opt}(2), \dots, \omega_{opt}(N) \}$  - диагональная матрица оптимальных фильтрующих множителей.

К сожалению, построенные оптимальные оценки (8), (10) включают в себя отношение «шум/сигнал», который на практике неизвестен из-за незнания значений «точного» коэффициента разложения  $\theta(i)$ , входящего в отношение «шум/сигнал». Поэтому эти оценки представляют теоретический интерес, так как указывают к чему надо стремиться при построении оценок, реализуемых на практике. Ниже будут рассмотрены несколько подходов к практической реализации оптимального (винеровского) алгоритма вейвлет-фильтрации.

**Эмпирический винеровский алгоритм вейвлет-фильтрации.** В этом алгоритме вместо неизвестного «точного» коэффициента  $\theta(i)$  берется «зашумленный» коэффициент разложения  $\tilde{\theta}(i)$  и тогда получаем следующие характеристики алгоритма:

$$\tilde{S}(i) = \frac{\sigma^2}{\tilde{\theta}^2(i)} \text{ и } \tilde{\omega}(i) = \frac{1}{1 + \tilde{S}(i)}. \quad (17)$$

В работах [2,3] показано, что коэффициент  $\tilde{\theta}(i)$  можно представить в виде:

$$\tilde{\theta}(i) = \theta(i) + \varepsilon(i),$$

где  $\varepsilon_i$  - случайная величина с нулевым средним и дисперсией  $\sigma^2$ . Тогда из (17) видно, что  $\tilde{S}(i) = \sigma^2 / (\theta(i) + \varepsilon(i))^2$  уже является

случайной величиной и при  $\sigma^2 \rightarrow \infty$  среднее значение  $\tilde{S}(i)$  не будет стремиться к  $\infty$ , а, следовательно, и  $\tilde{\omega}(i)$  также не будет стремиться к 0.

Для иллюстрации этого важного факта на Рис. 1 приведены кривые: 1 - значения оптимального фильтрующего множителя (14); 2 - значения фильтрующего множителя  $\tilde{\omega}(i)$  (17) при разных значениях отношения «шум/сигнал»  $S(i)$ .

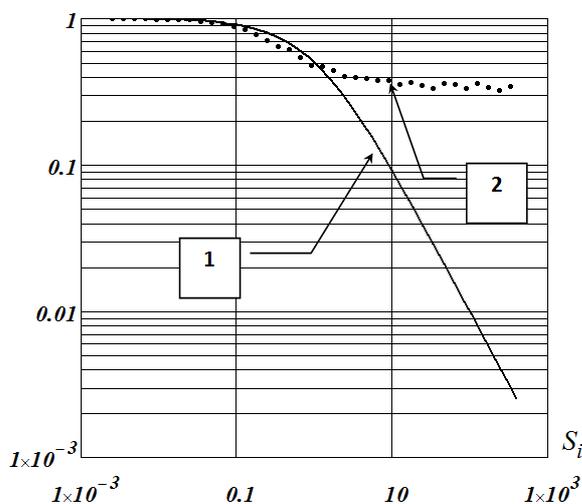


Рис. 1. Значения фильтрующих множителей

Видно, что среднее значение  $\tilde{\omega}(i)$  (вычисленное по выборке объемом 400) при увеличении  $S(i)$  стремится к постоянной величине (примерно 0.35), в то время как оптимальный фильтрующий множитель стремится к нулю. Следовательно, эмпирический винеровский алгоритм вейвлет-фильтрации имеет существенный недостаток: **при отношении «шум/сигнал» больше 1 фильтрующие множители  $\tilde{\omega}(i)$  не осуществляют эффективную фильтрацию шума, и результат такой фильтрации имеет СКО фильтрации значительно большую по сравнению с оптимальным (винеровским) алгоритмом вейвлет-фильтрации.**

Предположим, что вместо точного (но неизвестного) коэффициента  $\theta(i)$  в (12) будет использоваться некоторая оценка  $\hat{\theta}(i)$  этого коэффициента. Возникает вопрос: насколько увеличится СКО фильтрации при использовании эмпирического отношения «шум/сигнал»:

$$\hat{S}(i) = \frac{\sigma^2}{\hat{\theta}^2(i)}. \quad (18)$$

Можно показать, что СКО фильтрации (4) (обозначим как  $\Delta$ ) при использовании (18) можно представить в виде:

$$\Delta = \Delta_{opt} + \Delta_{emp}, \quad (19)$$

где

$$\Delta_{opt} = \sum_i \frac{S(i)}{1+S(i)} \theta^2(i) \quad (20)$$

- СКО фильтрации оптимального фильтра;

$$\Delta_{emp} = \sum_i \theta^2(i) \cdot (1+S(i)) \cdot \left[ \frac{1}{1+\hat{S}(i)} - \frac{1}{1+S(i)} \right]^2 \quad (21)$$

- дополнительная (эмпирическая) СКО, обусловленная заменой точного отношения  $S(i)$  на эмпирическое  $\hat{S}(i)$ . Очевидно, что, если  $\hat{S}(i) = S(i)$ , то  $\Delta_{emp} = 0$ .

Вывод: **чем точнее будет оценка  $\hat{\theta}(i)$ , тем меньше будет величина  $\Delta_{emp}$  и меньше будет суммарная СКО фильтрации (19).**

**Двухэтапный алгоритм вейвлет-фильтрации.** Как способ получения более точной оценки  $\hat{\theta}(i)$  (по сравнению с  $\tilde{\theta}(i)$ ) для выражения (18) в работе [6] был предложен алгоритм (названный эмпирическим винеровским фильтром), суть которого можно выразить следующими этапами:

**Этап 1.** С использованием дискретного ортогонального вейвлет-преобразования (матричное обозначение  $W_1$ ) вычисляются коэффициенты разложения  $\tilde{\theta}$ , т.е.  $\tilde{\theta} = W_1 \tilde{f}$ . Затем, с использованием порогового алгоритма обработки  $T_\lambda(\tilde{\theta})$  вычисляются «сглаженные» коэффициенты разложения  $\hat{\theta}_1 = T_\lambda(\tilde{\theta})$ . После этого берется обратное вейвлет-преобразование  $W_1^{-1}$  и получается вектор  $\hat{f}_1$  отфильтрованных значений, вычисление которого в матричном виде представимо как:

$$\hat{f}_1 = W_1^{-1} \cdot T_\lambda(\tilde{\theta}) \cdot W_1 \tilde{f} = W_1^{-1} \hat{\theta}_1. \quad (22)$$

Напомним основные понятия пороговых алгоритмов фильтрации (подробнее см. [1, 3]). В этих алгоритмах каждый коэффициент разложения  $\tilde{\theta}(i)$  подвергается индивидуальной обработке с использованием пороговых функций (в зарубежной литературе такая обработка получили название *thresholding*). Наиболее часто используются две пороговые функции:

- «жесткая» пороговая функция вида:

$$T_\lambda^h(\tilde{\theta}(i)) = \begin{cases} \tilde{\theta}(i), & \text{если } |\tilde{\theta}(i)| \geq \lambda, \\ 0, & \text{если } |\tilde{\theta}(i)| < \lambda; \end{cases} \quad (23)$$

- «мягкая» пороговая функция вида:

$$T_{\lambda}^s(\tilde{\theta}(i)) = \text{sign}(\tilde{\theta}(i)) \cdot \left[ |\tilde{\theta}(i)| - \lambda \right]_+, \quad (24)$$

где обозначение  $[z]_+$  определяется как  $[z]_+ = \begin{cases} z, & \text{если } z \geq 0; \\ 0, & \text{если } z < 0. \end{cases}$

Каждая из этих пороговых функций имеет свои особенности. Приведем только следующие, которые влияют на ошибку фильтрации:

- из-за уменьшения амплитуды коэффициента разложения на величину  $\lambda$  в функции  $T_{\lambda}^s(\tilde{\theta}(i))$  возможно сглаживание (размытие) контрастных элементов обрабатываемого сигнала;
- наличие в функции  $T_{\lambda}^h(\tilde{\theta}(i))$  разрыва в окрестности точки  $\lambda$  в определенной степени обуславливает появление осцилляций (эффекта Гиббса) в особых точках фильтруемого сигнала.

Однако основное влияние на ошибку фильтрации оказывает величина порога  $\lambda$ , играющая роль «управляющего» параметра. При заниженном значении  $\lambda$  часть коэффициентов разложения, обусловленных только шумом, не зануляются, и результат обратного вейвлет-преобразования (отфильтрованная функция) может содержать значительный остаточный шум, т.е. функция не достаточно сглажена. При завышенном пороге  $\lambda$  зануляются информативные коэффициенты и результат фильтрации оказывается переглаженным.

В работе [6] для получения оценок  $\hat{\theta}(i)$  обрабатываются только детализирующие коэффициенты  $\{\tilde{d}_{j,k}\}$  (аппроксимирующие  $\{\tilde{a}_{j,k}\}$  остаются без изменения из-за их небольшой относительной погрешности (см. [3])) с использованием функция (23) с так называемым универсальным порогом (для каждого  $j$ -го уровня разложения):

$$\lambda_j^j = \sigma \sqrt{2 \ln N_j}, \quad (25)$$

где  $N_j$  – число детализирующих коэффициентов на  $j$ -ом уровне разложения. Видно, что чем выше уровень разложения  $j$ , тем меньше величина порога.

**Этап 2.** К вектору  $\hat{f}_1$  применяется дискретное вейвлет преобразование  $W_2$ , которое отличается от  $W_1$ . Например, если в качестве  $W_1$  использовались вейвлеты Добеши  $Daub(8)$ , то в качестве  $W_2$  можно использовать  $Daub(16)$  или  $Daub(4)$ . Таким образом, вычисляется вектор коэффициентов разложения

$$\hat{\theta}_{21} = W_2 \hat{f}_1. \quad (26)$$

По проекциям этого вектора (предполагается, что  $\hat{\theta}_{21}(i)$  является более точной оценкой по сравнению с  $\tilde{\theta}(i)$ ) вычисляются фильтрующие множители

$$\omega_2(i) = \frac{\hat{\theta}_{21}^2(i)}{\hat{\theta}_{21}^2(i) + \sigma^2} = \frac{1}{1 + \frac{\sigma^2}{\hat{\theta}_{21}^2(i)}} = \frac{1}{1 + \hat{S}_2(i)} \quad (27)$$

и находятся сглаженный коэффициенты разложения

$$\hat{\theta}_2(i) = \frac{\hat{\theta}_{21}^2(i)}{\hat{\theta}_{21}^2(i) + \sigma^2} \tilde{\theta}_2(i) = \frac{1}{1 + \hat{S}_2(i)} \tilde{\theta}_2(i), \quad (28)$$

где  $\tilde{\theta}_2(i)$  – коэффициенты разложения  $\hat{\theta}_2 = W_2 \tilde{f}$ . В завершении этапа 2 вычисляется вектор  $\hat{f}_2 = W_2^{-1} \hat{\theta}_2$ , содержащий результат фильтрации описанным алгоритмом.

Если обозначить через  $N_T$  – число ненулевых коэффициентов  $\hat{\theta}_1$ , вычисленных на первом этапе, то суть описанного двухступенчатого алгоритма заключается в том, что дискретное преобразование  $W_{21} = W_2 W_1^{-1}$  трансформирует («растягивает»)  $N_T$  коэффициентов в  $N$  ( $N > N_T$ ) коэффициентов  $\hat{\theta}_{21}$ , которые используются для построения оценок  $\omega_2(i)$  оптимальных фильтрующих множителей  $\omega_{opt}(i)$  на втором этапе.

Для иллюстрации эффективности описанного алгоритма в работе [6] выполнен вычислительный эксперимент вейвлет-фильтрации разных по форме сигналов разными алгоритмами. Суть результатов этих экспериментов можно выразить следующими отношениями, которые показывают во сколько раз ошибка фильтрации того или иного алгоритма больше ошибки оптимального (винеровского) алгоритма:

$$\frac{\|\hat{f}_1 - f\|^2}{\|\hat{f}_{opt} - f\|^2} \in [2.2 \div 2.8]; \quad \frac{\|\hat{f}_2 - f\|^2}{\|\hat{f}_{opt} - f\|^2} \in [1.4 \div 1.9]. \quad (29)$$

Видно, что хотя вектор  $\hat{f}_2$  (результат двухэтапного алгоритма) имеет меньшую ошибку по сравнению с вектором  $\hat{f}_1$  (пороговый алгоритм фильтрации), но эта ошибка значительно больше ошибки оптимального алгоритма вейвлет-фильтрации. Это не позволяет назвать описанный алгоритм квазиоптимальным.

**Квазиоптимальный двухэтапный алгоритм вейвлет-фильтрации.** По-видимому, причиной значительной ошибки фильтрации описанным алгоритмом является низкая точность оценки  $\hat{\theta}_1 = T_{\lambda}^h(\tilde{\theta})$ , вычисленные с помощью пороговой функции

(23) с пороговой величиной (25). Показано [3], что эта пороговая величина не является хорошей оценкой оптимального значения  $\lambda_{opt}^j$ .

Поэтому в данной работе для повышения точности оценки  $\hat{\theta}_1$  предлагается использовать эффективную оценку оптимального порога, основанной на критерии оптимальности.

Критерий оптимальности был предложен в работе [7] и широко используется для выбора параметра регуляризации линейных регуляризирующих алгоритмов решения некорректных задач [8,9]. Алгоритмы, построенные на основе этого критерия, позволяют оценить оптимальный (с хорошей точностью) параметр регуляризации, не используя при этом количественную информацию об искомом решении задачи. Для выбора параметра сглаживания в линейных алгоритмах Фурье – фильтрации этот критерий использовался в работе [3, с. 37–45].

Заметим, что все выше названные алгоритмы являются линейными (при заданной величине параметра). Пороговые алгоритмы вейвлет - фильтрации являются нелинейными. Однако идея критерия оптимальности позволила и в этом случае эффективно оценить оптимальную пороговую величину.

Следуя работам [2, 3] величину порога на каждом  $j$ -ом уровне разложения будем задавать выражением

$$\lambda_j(\beta) = \beta \sqrt{2 \cdot \ln(N_j)}, \quad (30)$$

Тогда необходимо построить оценку для величины  $\beta_{opt}$ , которая минимизирует СКО фильтрации при использовании пороговых величин (30). Для этого введем критерий  $\rho_W(\alpha)$ , определяемый выражением

$$\rho_W(\beta) = \sum_{i=1}^m \frac{e\beta_i \cdot \tilde{f}_i}{\sigma^2}, \quad (31)$$

где  $e\beta_i = \tilde{f}_i - \hat{f}\beta_i$  - компоненты вектора невязки, определяемые разницей между заданным значением сигнала  $\tilde{f}_i$  и отфильтрованным  $\hat{f}\beta_i$  при параметре  $\beta$ . Можно показать, что при использовании ортогональных вейвлетов, критерий  $\rho_W(\beta)$  вычисляются через коэффициенты вейвлет-разложения:

- для функции *soft*

$$\rho_W(\beta) = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \sum_{j=j_0+1}^{j_0+J} \sum_k \tilde{d}_{j,k} \cdot (\tilde{d}_{j,k} - \text{soft}(\tilde{d}_{j,k}; \lambda_j(\beta)));$$

- для функции *hard*

$$\rho_W(\beta) = \frac{1}{\sigma^2} \cdot \sum_{j=j_0+1}^{j_0+J} \sum_k \tilde{d}_{j,k} \cdot (\tilde{d}_{j,k} - \text{hard}(\tilde{d}_{j,k}; \lambda_j(\beta)))$$

В качестве оценки  $\beta_W$  оптимального параметра  $\beta$  значение  $\beta_W$ , для которого выполняется неравенство

$$\vartheta_{m,\gamma/2} \leq \rho_W(\alpha_w) \leq \vartheta_{m,1-\gamma/2}, \quad (32)$$

где  $\vartheta_{m,\gamma/2}$ ,  $\vartheta_{m,1-\gamma/2}$  квантили  $\chi_m^2$  - распределения с  $m$  степенями свободы уровней  $\gamma/2$ ,  $1-\gamma/2$  соответственно,  $\gamma$  - вероятность ошибки первого рода при проверке статистической гипотезы об оптимальности параметра сглаживания,  $m=N$  - число значений фильтруемого сигнала. Тогда в качестве пороговой величины, вычисленной на основе критерия оптимальности, принимается значение

$$\lambda_j^W = \beta_W \sqrt{2 \cdot \ln(N_j)}. \quad (33)$$

Для вычисления  $\beta_W$  используется любая итерационная процедура решения уравнения

$$\rho_W(\alpha) = m, \quad (34)$$

которая завершается, как только очередное приближение  $\beta^{(n)}$  удовлетворяет условию (32).

Если число степеней свободы  $m > 30$ , то  $\chi_m^2$  - распределение хорошо аппроксимируется нормальным распределением с математическим ожиданием  $m$  и дисперсией  $2m$ . Тогда, приняв вероятность ошибки первого рода  $\gamma = 0.05$ , получаем формулы для вычисления квантилей, входящих в неравенство (32)

$$\begin{aligned} \vartheta_{m,0.025} &= m - 1.96\sqrt{2m}; \\ \vartheta_{m,0.975} &= m + 1.96\sqrt{2m}. \end{aligned} \quad (35)$$

Существенной чертой приведенного алгоритма вычисления  $\beta_W$  является использование дисперсии шума  $\sigma^2$ . На практике, как правило, эта величина неизвестна, и в этом случае можно использовать оценку

$$\hat{\sigma} = \frac{\text{median}(|\tilde{d}_{1,k}|)}{0.6745}, \quad (36)$$

где оператор  $\text{median}(|\tilde{d}_{1,k}|)$  вычисляет медиану абсолютных величин детализирующих коэффициентов уровня разложения  $j_0+1$  (объем выборки равен  $N/2$ ). Эта оценка широко используется в робастных алгоритмах регрессионного анализа. Применительно к алгоритмам вейвлет – фильтрации эта оценка исследовалась в работе [2], где была показана приемлемая точность оценки (36). Так для заданной дисперсии  $\sigma^2 = 0.91 \cdot 10^{-1}$  значения оценки (36), вычисленные по 30 реализациям длиной ( $N/2=1024$ ) находились в интервале  $[0.88 \cdot 10^{-1}, 0.97 \cdot 10^{-1}]$ .

Заметим, что проведенные в работах [2, 3] исследования (с применением и других алгоритмов выбора пороговой величины), показали, что в качестве наилучшей пороговой величины в пороговых алгоритмах обработки коэффициентов разложения зашумленных сигналов и изображений, **целесообразно**

использовать пороговую величину  $\lambda_j^W$ , определяемую выражением (33) и найденную с использованием критерия оптимальности. Проиллюстрируем это только одним рисунком. На Рис. 2 как функции параметра  $\beta$  показаны:

- кривая 1 – значения относительной ошибки фильтрации  $\Delta(\beta) = \frac{\|\hat{f}_{W\beta} - f\|^2}{\|f\|^2}$ ;
- кривая 2 – значения критерия  $\rho_W(\beta)$ ;
- кривые 3,4 – границы интервала  $[\vartheta_{2048,0.025}, \vartheta_{2048,0.975}]$ , которые в масштабе рисунка практически совпадают.

Видно, что значения параметра  $\beta$ , при которых  $\rho_W(\beta)$  попадают в интервал  $[\vartheta_{2048,0.025}, \vartheta_{2048,0.975}]$ , т. е. значения  $\beta_W$  (на рис. обозначены  $\beta_W$ ) соответствуют минимуму относительной ошибки фильтрации. Поэтому на первом этапе описанного двухэтапного алгоритма будем использовать пороговые величины  $\lambda_j^W$ , в эффективности которых убедимся на результатах следующего эксперимента.

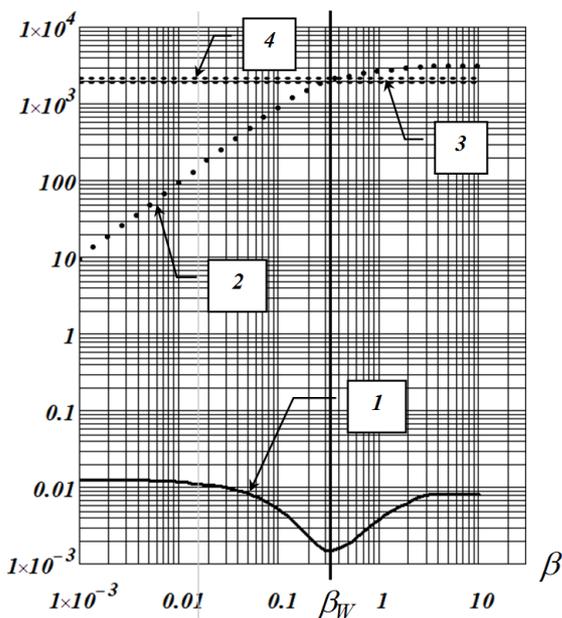


Рис. 2. Выбор параметра  $\beta$  на основе критерия оптимальности

**Результаты вычислительного эксперимента.** В качестве тестового одномерного сигнала был взят дискретный сигнал (число отсчетов  $N = 2056$ ), зашумленные значения которого (вектор  $\tilde{f}$ ) приведены на рис. 3 (относительный уровень шума

$$\frac{\|\tilde{f} - f\|}{\|f\|} = 0.12$$

). Выбор такой формы сигнала обусловлен присутствием в его спектре высокочастотных составляющих, что существенно затрудняет фильтрацию высокочастотного (не коррелированного) шума из-за наложения спектров сигнала и шума.

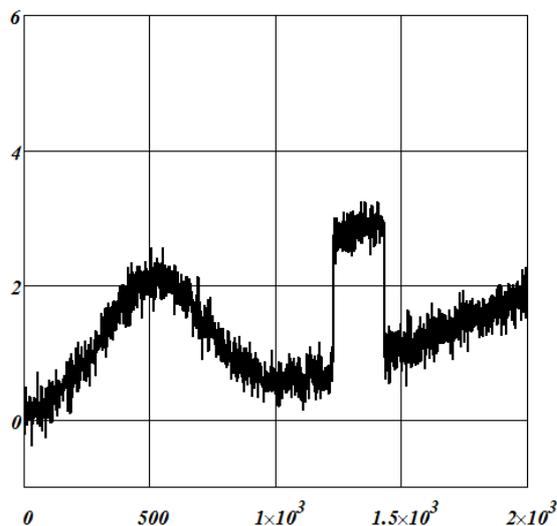


Рис. 3. Зашумленные значения сигнала

По зашумленным значениям функции (вектор  $\tilde{f}$ ) были вычислены следующие векторы:

- $\hat{f}_{1W}$  - вейвлет-фильтрация ( $W_1 = Daub(8)$ ) с пороговой функцией (23) и пороговыми величинами (25);
- $\hat{f}_{1W}$  - вейвлет-фильтрация ( $W_1 = Daub(8)$ ) с пороговой функцией (23) и пороговыми величинами (33);
- $\hat{f}_{opt}$  - оптимальная (винеровская) вейвлет-фильтрация  $Daub(8)$  с фильтрующими множителями (7);
- $\hat{f}_{2U}$  - результат двухэтапной вейвлет-фильтрация (в качестве оценки  $\hat{f}_1$  брался вектор  $\hat{f}_{1U}$ ),  $W_2 = Daub(4)$ );
- $\hat{f}_{2W}$  - результат двухэтапной вейвлет-фильтрация (в качестве оценки  $\hat{f}_1$  брался вектор  $\hat{f}_{1W}$ ),  $W_2 = Daub(4)$ ).

На Рис. 4 показаны «точные» значения функции (сплошная кривая) и значения проекций вектора  $\hat{f}_{2W}$ , из сравнения которых видно хорошее качество фильтрации предложенным двухэтапным алгоритмом.

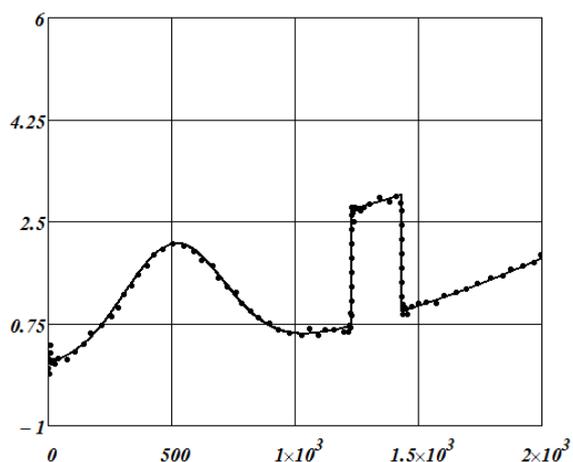


Рис. 4. Отфильтрованные значения функции

Для количественного подтверждения этого свойства приведем отношения, которые показывают во сколько раз ошибка фильтрации того или иного алгоритма больше ошибки оптимального алгоритма:

$$\frac{\|\hat{f}_{1U} - f\|^2}{\|\hat{f}_{opt} - f\|^2} = 2.65; \quad \frac{\|\hat{f}_{1W} - f\|^2}{\|\hat{f}_{opt} - f\|^2} = 1.41. \quad (37)$$

$$\frac{\|\hat{f}_{2U} - f\|^2}{\|\hat{f}_{opt} - f\|^2} = 1.38; \quad \frac{\|\hat{f}_{2W} - f\|^2}{\|\hat{f}_{opt} - f\|^2} = 1.08. \quad (38)$$

Сравнивая отношения (37), видим, что использование пороговой величины (33) на первом этапе существенно уменьшает ошибку фильтрации и это обуславливает «вторичное» уменьшение ошибки фильтрации на втором этапе – превышение ошибки фильтрации над минимальным значением составляет всего 8 %. Это позволяет назвать предложенный двухэтапный алгоритм с пороговыми величинами (33) квазиоптимальным.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Подобные результаты наблюдались в численных исследованиях с другими по форме одномерными сигналами, искаженными шумами с разными относительными уровнями. Следовательно, можно рекомендовать предложенный двухэтапный алгоритм с пороговыми величинами (33) как более предпочтительным по сравнению с двухэтапным алгоритмом работы [6].

## ЛИТЕРАТУРА

[1] Fodor, I. K., Kamath C. Denoising through Wavelet Shrinkage: An Empirical Study. SPIE Journal on Electronic Imaging. 2003. Vol.12, N 1, pp. 151–160.  
 [2] Воскобойников Ю.Е., Гочаков А.В. Оценивания оптимальных пороговых величин в алгоритмах вейвлет-фильтрации изображений. Автометрия. 2011. т. 47. №2. С. 3–12.

[3] Воскобойников Ю.Е., Гочаков А.В., Колкер А.Б. Фильтрации сигналов и изображений: Фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad) Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2010. 188 с.  
 [4] Mallat S. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of  $L^2(\mathbb{R})$ . Trans. AMS. 1989. v.315. N1. P. 69–87.  
 [5] Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1989. v.11. N 9. P. 674–693.  
 [6] Ghael S.P., Sayeed A.M., Baraniuk R.G. Improved wavelet denoising via empirical Wiener filtering. Proceedings of SPIE, 1997. Vol.3169. P.389–399.  
 [7] Воскобойников Ю. Е. Оценивание оптимального параметра регуляризирующего алгоритма восстановления изображений. Автометрия. 1995. № 3. С. 64–72.  
 [8] Воскобойников Ю. Е. Устойчивые методы и алгоритмы параметрической идентификации: Монография Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006.–186 с.  
 [9] Воскобойников Ю.Е. Устойчивые алгоритмы решения обратных измерительных задач: Монография. Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), НГАСУ. 2007. – 184 с.



**Воскобойников Юрий Евгеньевич**, 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 автоматкии НГТУ. Автор более 286 публикаций, 5 монографий, посвященных решению некорректных задач интерпретации данных и обработке сигналов и изображений и большого числа учебных пособий.  
 E-mail: [voscob@mail.ru](mailto:voscob@mail.ru)

## Two-Step Quasi-Optimal Algorithm of Wavelet Filtering of Signals and Images

Yu.E. VOSKOBOYNIKOV

*Abstract:* This paper considers the construction of quasi-optimal algorithm, similar in structure to the Wiener optimal algorithm. In the proposed algorithm the evaluation of unknown noise-to-signal relationship is performed for each coefficient in the second step on the base of signal obtained in the first step using a thresholding wavelet filtration algorithms. It is shown that with the choice of threshold values by the optimality criterion with the use of such filtering algorithm the error is significantly reduced as compared with the conventional wavelet-filtering algorithms.

*Keywords:* wavelet filtering algorithms, optimal algorithm, quasi-optimal algorithms, two-stage

algorithms of wavelet filtering.

#### REFERENCES

- [1] Fodor, I. K., Kamath C. Denoising through Wavelet Shrinkage: An Empirical Study//SPIE Journal on Electronic Imaging. 2003. Vol.12, N 1, pp. 151–160.
- [2] Voskobochnikov Ju.E., Gochakov A.V. Ocenivaniya optimal'nyh porogovyh velichin v algoritmah vejvlet-fil'tracii izobrazhenij //Avtometrija. 2011. t. 47. №2. S. 3–12.
- [3] Voskobochnikov Ju.E., Gochakov A.V., Kolker A.B. Fil'tracii signalov i izobrazhenij: Fur'e i vejvlet algoritmy (s primerami v Mathcad) Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2010. 188 s.
- [4] Mallat S. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of  $L^2(\mathbb{R})$  // Trans. AMS. 1989. v.315. N1. P. 69–87.
- [5] Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1989. v.11. N 9. P. 674–693.
- [6] Ghael S.P., Sayeed A.M., Baraniuk R.G. Improved wavelet denoising via empirical Wiener filtering//Proceedings of SPIE, 1997. Vol.3169. P.389–399.
- [7] Voskobochnikov Ju. E. Ocenivanie optimal'nogo parametra reguljarizirujushhego algoritma vosstanovlenija izobrazhenij. Avtometrija. 1995. № 3. S. 64–72.
- [8] Voskobochnikov Ju. E. Ustojchivye metody i algoritmy parametriceskoj identifikacii: Monografija / Ju. E. Voskobochnikov. – Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2006.–186 s.
- [9] Voskobochnikov Ju.E. Ustojchivye algoritmy reshenija obratnyh izmeritel'nyh zadach : Monografija. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), NGASU. 2007. – 184 s.

# Идентификация нелинейной системы прямого нагрева воздуха

К.Ю. Ласточкин, И.О. Приходько  
ФГБОУ ВПО «НГТУ»

**Аннотация:** рассматривается вопрос идентификации нелинейной двухканальной системы прямого нагрева воздуха. Представлен пример применения пакетов программ MATLAB и Real Time Windows Target для связи с объектом через плату аналогового ввода/вывода и последующим управлением исполнительными устройствами и получением данных с датчиков в реальном времени.

**Ключевые слова:** прямой нагрев воздуха, идентификация, многоканальный объект, нелинейная система, Real Time Windows Target.

## ВВЕДЕНИЕ

Прямой нагрев воздуха широко используется в системах приточной вентиляции зданий производственного и сельскохозяйственного назначения. Актуальной задачей в таких системах становится поддержание температуры воздуха на заданном уровне в условиях изменяющейся скорости воздушного потока. Эффективное управление реальным процессом строится на знании его поведения и свойств, которые могут быть выражены в виде математической модели.

В статье рассмотрен способ идентификации нелинейной системы на примере объекта, имитирующего работу системы приточной вентиляции. Результаты могут быть использованы для организации интеллектуального управления.

## ОБЪЕКТ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Идентифицируемый объект представляет собой квадратную металлическую полую трубу, внутри которой установлен нагревательный элемент, а на одном из торцов электровентилятор. Объект имитирует систему прямого нагрева воздуха в системах приточной вентиляции (данные системы служат для нагрева свежего воздуха в системах отопления и вентиляции) [1]. Для проведения эксперимента в объект дополнительно установлены 3 датчика температуры и датчик скорости вращения лопастей вентилятора. Датчики температуры установлены на разном расстоянии от нагревательного элемента внутри трубы (для исследования влияния месторасположения датчика на получаемый результат). Для измерения скорости воздушного потока на противоположном торце от исполнительного вентилятора установлен свободно вращающийся лопастный винт. К его оси прикреплена круглая пластина с отверстиями, которая вращается в оптическом датчике для измерения скорости вращения (Рис. 1).

Управление нагревательным элементом и электровентилятором, а также обработка сигналов с датчиков выполняется с помощью персонального компьютера с установленным программным обеспечением (MATLAB R2011b + Real Time Windows Target [2]) и подключённой к нему через последовательный интерфейс дополнительной платы аналогового ввода/вывода (Рис. 2) [3].

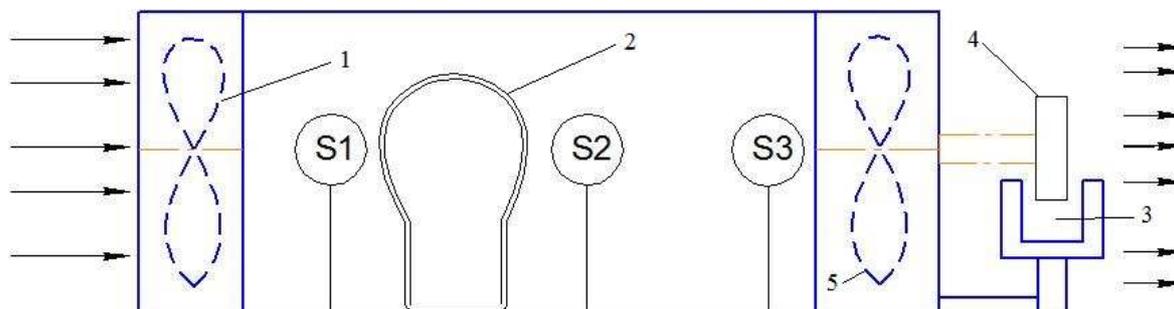


Рис. 1. Схематическое изображение объекта идентификации: 1 – электровентилятор, 2 – нагревательный элемент, 3 – оптический датчик измерения скорости вращения, 4 – диск с отверстиями, 5 – свободно вращающийся лопастный винт.



Рис. 2. Схема связи между персональным компьютером и идентифицируемым объектом

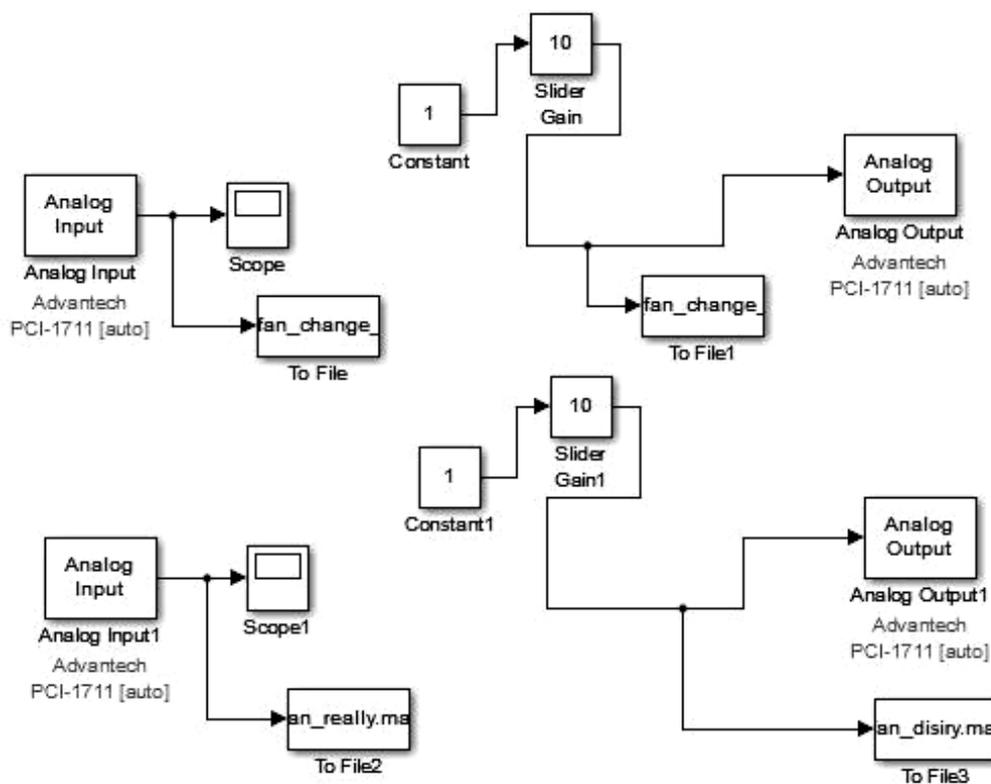


Рис. 3. Схема в MATLAB Simulink

На Рис. 3 показана схема моделирования системы в программе *MATLAB Simulink*. Диапазон значений аналоговых выходов CH1 и CH2 от 0 до +10 В. Посредством изменения этих значений с помощью специального блока аналогового выхода в *MATLAB R2011b*

(предварительно синхронизированного с платой ввода/вывода) производится пропорциональное управление скоростью вращения вентилятора и температурой нагрева. Опытным путём выяснено, что электровентилятор имеет зону нечувствительности в диапазоне от 0 до +1 В по

причине инертности лопастей. Диапазон значений аналоговых входов  $CH1-4$  от  $-10$  до  $+10$  В. Первые три канала используются для получения данных с трёх датчиков температуры, а четвёртый для получения данных с оптического датчика измерения скорости вращения. Получение данных на персональном компьютере происходит с помощью блока аналогового входа, синхронизованным с платой ввода/вывода выше описанным способом (Рис. 3).

### АЛГОРИТМ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Идентификация объекта и описание его математической модели производится на основе статических и динамических характеристик, которые могут быть получены путем непосредственных измерений. Задача идентификации – как можно более точно и полно описать систему.

Статическая характеристика объекта отображает зависимость его выхода от входного воздействия. Схема измерения в среде *Matlab* приведена на рис. 3.

Объект имеет 2 входа и 2 выхода (3 датчика температуры используются вместе). Для описания системы необходимо определить 3 передаточные функции, описывающие:

- влияние мощности нагрева лампы на окружающую температуру;
- влияние скорости вращения вентилятора на окружающую температуру;
- влияние скорости вращения вентилятора на скорость воздушного потока.

Измерения производятся следующим образом: для каждого шага входного воздействия измеряется установившееся значение. Для определения установившегося значения используется усредняющий фильтр для последних 20 значений перед очередным скачком входного воздействия. На основе этих измерений строится статическая характеристика  $u(u)$ . Результаты представлены на Рис. 4, 7, 9.

Второй, наиболее значимой частью идентификации является получение модели системы, которая описывает динамические свойства объекта.

На основе данных (Рис. 5, 8, 10) возможно получить набор передаточных функций, каждая из которых максимально соответствует переходному процессу в своей рабочей точке. Получение передаточной функции производится путем минимизации стоимостной функции, представленной квадратичным критерием [4]. Для поиска используется функция *Matlab fminsearch*.

$$J = \min_x \sum_{i=1}^N (y_i - y_{M1}(x))^2$$

После анализа переходных процессов, предполагаемая передаточная функция имеет вид

$$F(p) = \frac{b_0}{a_1 p + 1}$$

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Влияние мощности нагрева лампы на температуру окружающего воздуха при неизменяющейся скорости воздушного потока (передаточная функция  $F_{PT}$ ). Статические характеристики для 3-х температурных датчиков представлены на Рис. 4. Зависимость входного и выходных сигналов от времени представлена на Рис. 5. По этим графикам можно судить также о влиянии расстояния от нагревателя до датчика на форму статической и динамической характеристик. 3-й датчик удален от нагревателя, вследствие чего влияние на него уменьшается. Также на основании наблюдений можно сделать вывод, что в диапазоне входных значений  $u = 0 \div 2$  В температура определяется окружающей средой, а не нагревателем. Для идентификации был выбран 2-й датчик, так как на его выходе наблюдается наименьшая зашумленность. Пример идентификации участка динамической характеристики приведен на Рис. 6. Результаты идентификации представлены в Таблице 1.

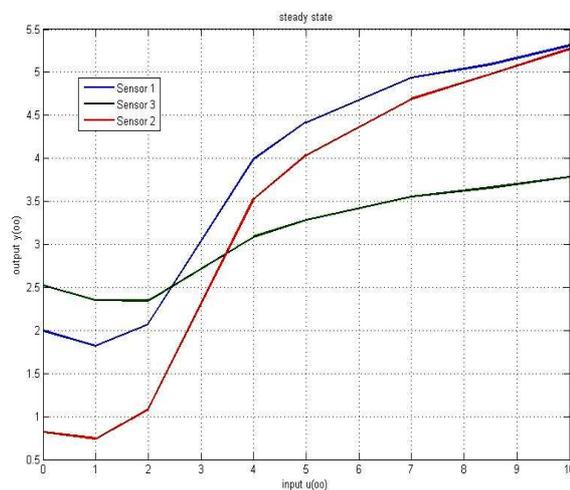


Рис. 4. Статические характеристики для трех датчиков: зависимость от температуры

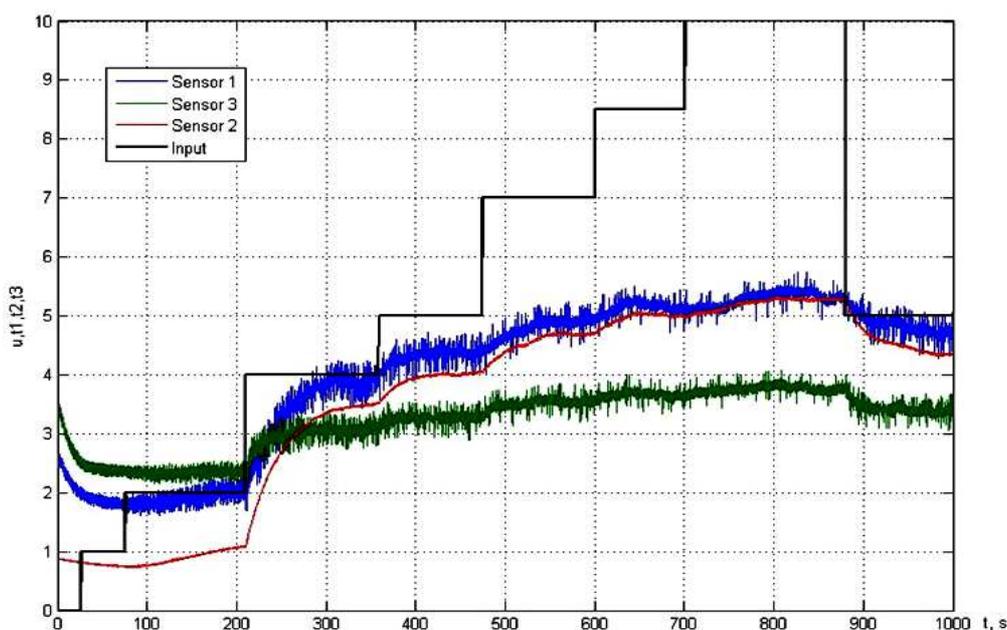


Рис. 5. Динамические характеристики 3-х датчиков. Зависимость от температуры

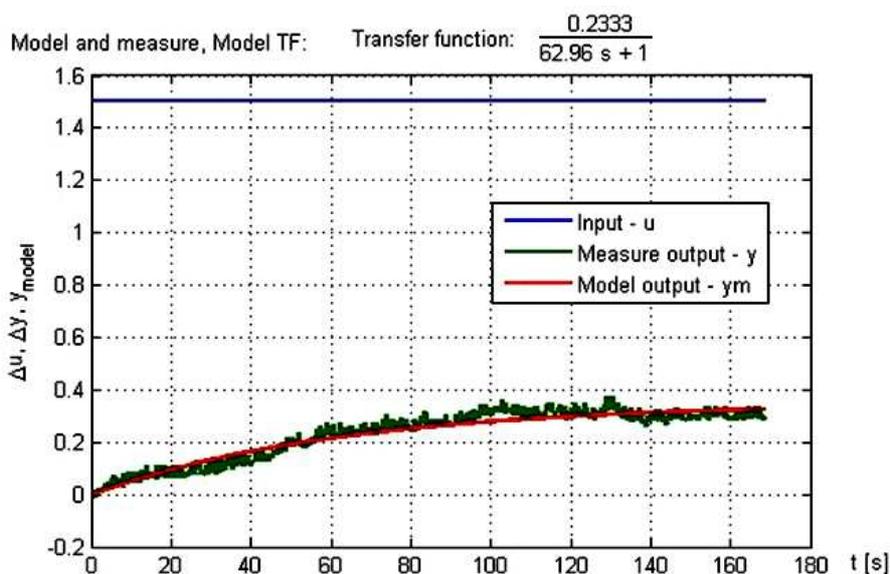


Рис. 6. Пример идентифицированного участка переходного процесса

Таблица 1. Результаты идентификации  $F_{PT}$

Диапазон входных значений	Передаточная функция
0÷2В	-
2÷4В	$F_{PT}(p) = \frac{1.25}{38.56p + 1}$
4÷5В	$F_{PT}(p) = \frac{0.5}{22.87p + 1}$
5÷7В	$F_{PT}(p) = \frac{0.35}{37.96p + 1}$
7÷10В	$F_{PT}(p) = \frac{0.23}{62.96p + 1}$

Влияние скорости вращения вентилятора на окружающую температуру (передаточная функция  $F_{VT}$ ). Измерение производится при постоянном максимальном входном воздействии на нагреватель. Статические характеристики для 3-х температурных датчиков представлены на Рис. 7. Зависимость входного и выходного сигналов от времени представлена на Рис. 8. При максимальной скорости воздушного потока температура датчиков опускается до комнатной. При идентификации не учитываются первые 300 секунд из-за зоны нечувствительности электровентилятора. Результаты идентификации представлены в Таблице 2.

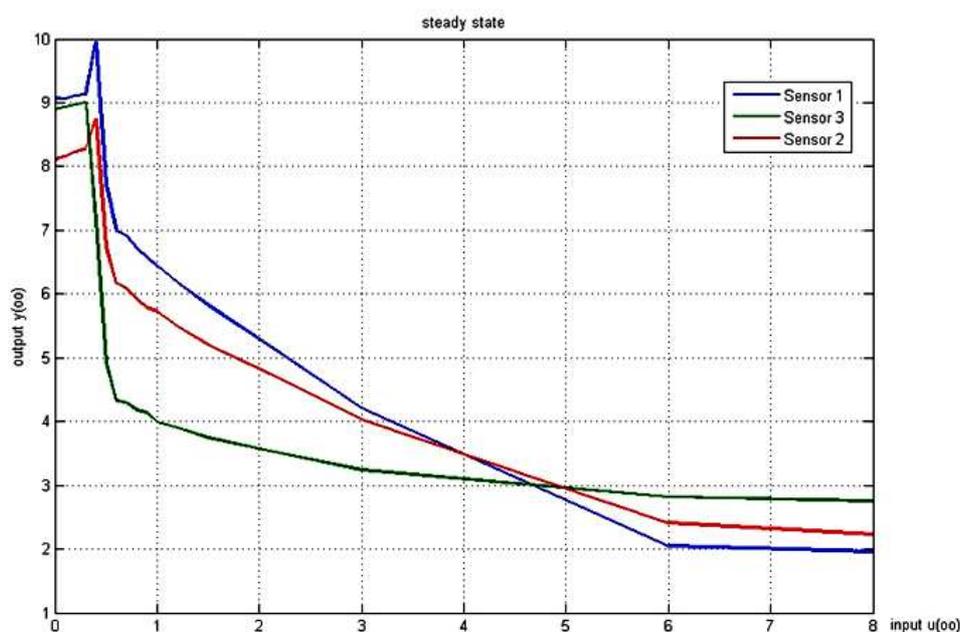


Рис. 7. Статические характеристики 3-х датчиков. Зависимость от скорости воздушного потока

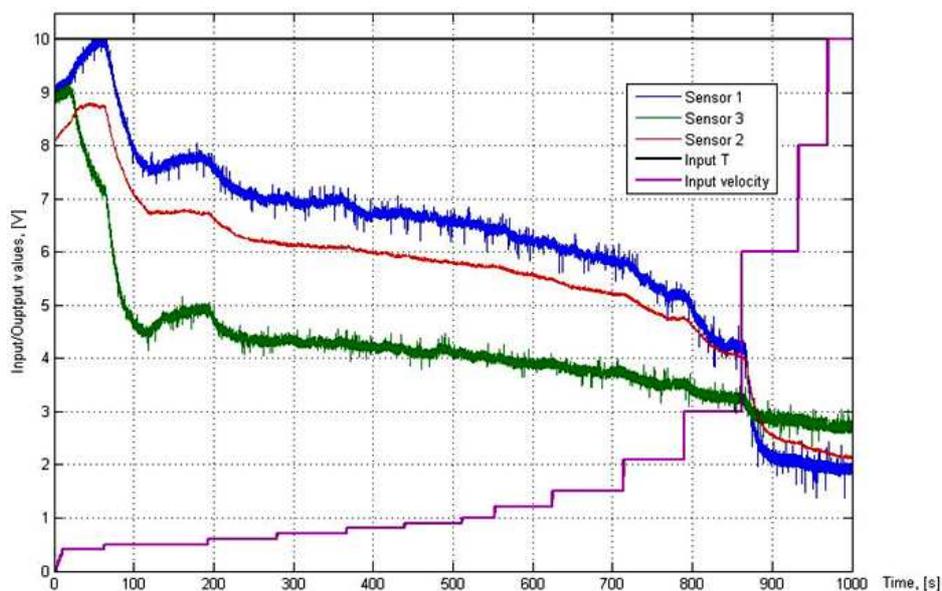


Рис. 8. Динамические характеристики 3-х датчиков. Зависимость от температуры

Таблица 2. Результаты идентификации  $F_{VT}$

Диапазон входных значений	Передаточная функция
0÷1В	-
1÷1.5В	$F_{VT}(p) = \frac{-1.15}{140p + 1}$
1.5÷2В	$F_{VT}(p) = \frac{-1.7}{67.5p + 1}$
2÷3В	$F_{VT}(p) = \frac{-1.3}{26.71p + 1}$
3÷6В	$F_{VT}(p) = \frac{-0.75}{15p + 1}$
6÷8В	$F_{VT}(p) = \frac{-0.006}{0.004p + 1}$

Влияние скорости вращения вентилятора на скорость воздушного потока (передаточная функция  $F_{VV}$ ). Статическая характеристика представлена на Рис. 9. Зависимость входного и выходного сигналов от времени представлена на рис. 10. Колебания на участке  $t = 0\div300$  обусловлены инертностью лопастей, этот участок при идентификации не учитывается. Результаты идентификации представлены в Таблице 3. Точка ( $u = 2, y = 4$ ) расценивается как случайное отклонение и в расчете не учитывается.

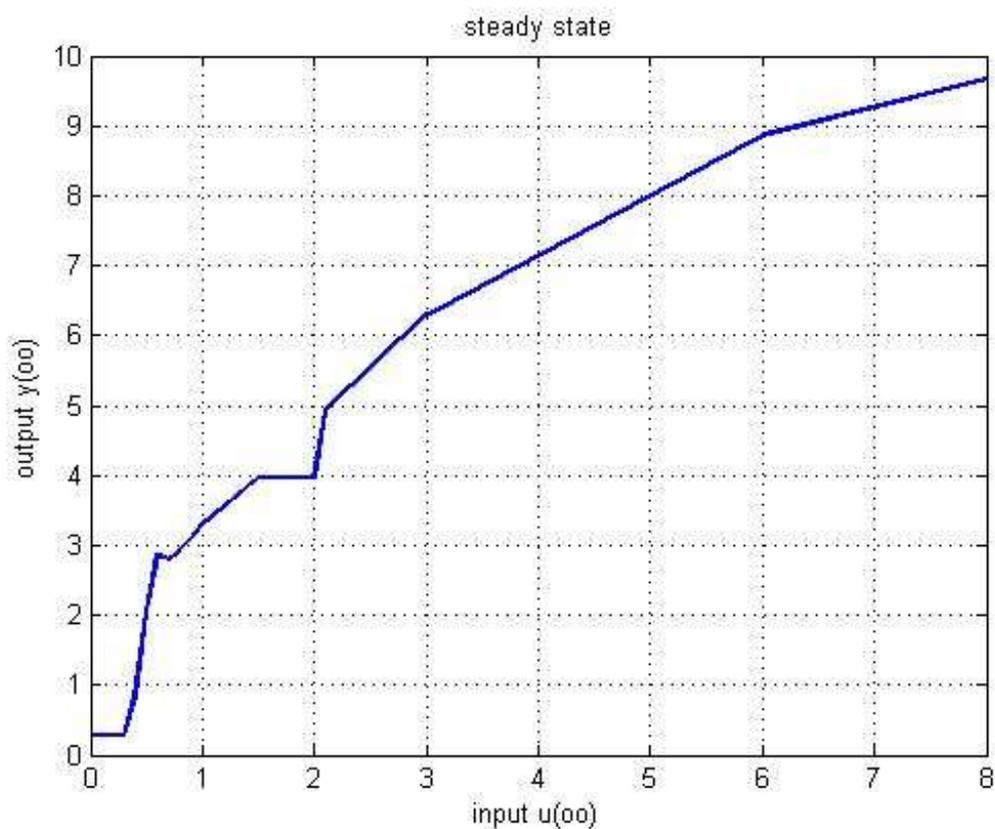


Рис. 9. Статическая характеристика датчика скорости

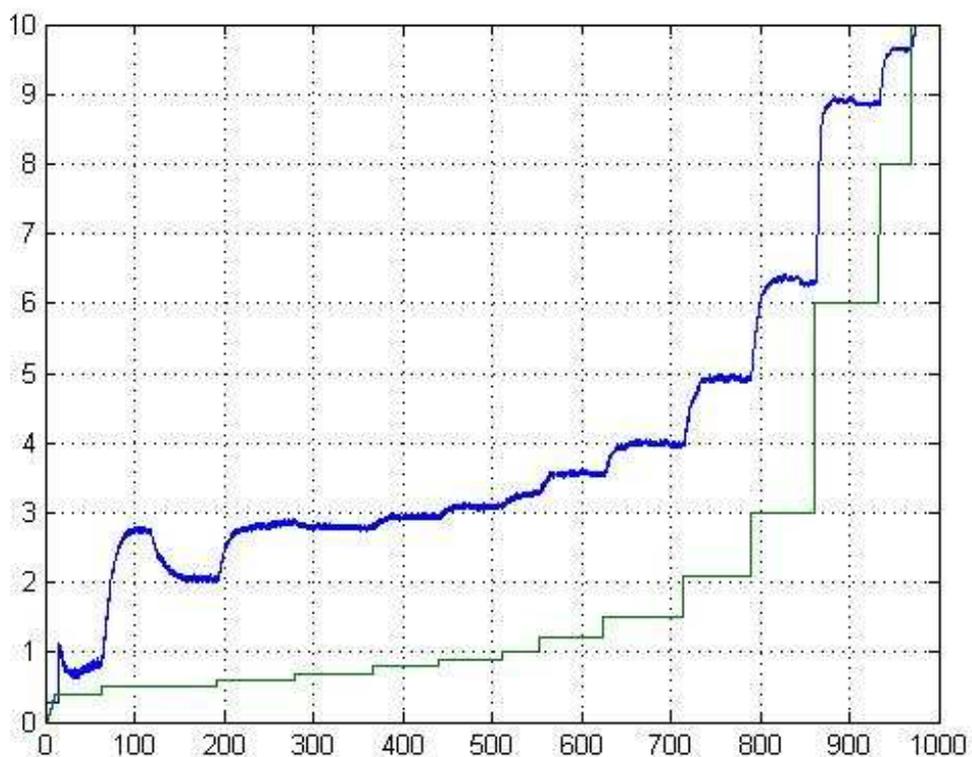


Рис. 10. Динамическая характеристика датчика скорости

Таблица 3. Результаты идентификации  $F_{VV}$ 

Диапазон входных значений	Передаточная функция
0÷1В	-
1÷1.5В	$F_{VV}(p) = \frac{1.5}{9.52p + 1}$
1.5÷3В	$F_{VV}(p) = \frac{1.6}{9.15p + 1}$
3÷6В	$F_{VV}(p) = \frac{0.87}{4.35p + 1}$
6÷8В	$F_{VV}(p) = \frac{0.39}{4.75p + 1}$

## ВЫВОДЫ

При идентификации нелинейной системы итоговую передаточную функцию можно представить в виде кусочно-линейной функции, каждый участок которой соответствует определенному диапазону входных значений. Данное представление позволяет реализовать интеллектуальное управление и может быть использовано в реальных системах, в том числе для прямого нагрева воздуха в системах приточной фильтрации.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Системы прямого нагрева [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.e-res.ru/sistemy-pryamogo-nagreva.html>
- [2] Real-Time Windows Target [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://matlab.ru/products/real-time-windows-target/real-time-windows-target\\_rus\\_web.pdf](http://matlab.ru/products/real-time-windows-target/real-time-windows-target_rus_web.pdf)
- [3] Analog and Digital I/O Card [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://accessio.com/MANUALS/AD12-16F.PDF>
- [4] Методы решения задачи минимизации квадратичной функции: учеб. пособие / К. В. Григорьева. – СПб, 2009. – 19 с.



**Ласточкин Кирилл Юрьевич** – магистрант кафедры Автоматики факультета АВТ НГТУ, магистрант Faculty of Mechatronics, Technical University of Liberec.  
E-mail: [kirill.avt@gmail.com](mailto:kirill.avt@gmail.com)



**Приходько Игорь Олегович** – магистрант кафедры Автоматики факультета АВТ НГТУ, магистрант Faculty of Mechatronics, Technical University of Liberec.  
E-mail: [igor\\_prih92@mail.ru](mailto:igor_prih92@mail.ru)

## Identification of Nonlinear Systems of Direct Air Heating

K. YU. LASTOCHKIN, I. O. PRIKHODKO.

*Abstract:* The paper deals with the question of identification of nonlinear two-channel system with direct air heating. It gives an example of using application software packages MATLAB and Real Time Windows Target to communicate with the object through the analog I/O card and the subsequent management of executive devices and the with the receiving of the signal from sensor in real time.

*Keywords:* direct heating of the air, identification, multi channel object, nonlinear system, Real Time Windows Target.

## REFERENCES

- [1] Direct heating systems [electronic resource]. - Available at URL: <http://www.e-res.ru/sistemy-pryamogo-nagreva.html>
- [2] Real-Time Windows Target [electronic resource]. - Available at URL: [http://matlab.ru/products/real-time-windows-target/real-time-windows-target\\_rus\\_web.pdf](http://matlab.ru/products/real-time-windows-target/real-time-windows-target_rus_web.pdf)
- [3] Analog and Digital I / O Card [electronic resource]. - Available at URL: <http://accessio.com/MANUALS/AD12-16F.PDF>
- [4] The methods for solving the problem of minimizing a quadratic function: Proc. Manual / KV Grigorieva. - St. Petersburg, 2009. - 19 p.

# Использование модулярной арифметики при фазовых измерениях

Гужов В.И., Кабак Е.С., Орлов И.С.

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** В статье рассматривается новый алгоритм перехода от модулярного представления чисел к позиционному, который может быть использован при фазовых измерениях в реальных системах.

**Ключевые слова:** Теория чисел, модулярная арифметика, фазовая неоднозначность, интерференционные методы измерений.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Интерференционные методы измерений в качестве эталона используют длину волны освещения. Следствием этого является периодичность результатов фазовых измерений, связанная с периодичностью световой волны. Для повышения динамического диапазона необходимо устранить фазовую неоднозначность.

Общий способ (развертка фазы), который применяется для устранения этой проблемы, основан на добавлении (или вычитании) значений кратных периоду к измеренным значениям.

Однако при использовании методов развертки фазы возникает ряд проблем. Процесс определения скачков фазовых переходов требует поэлементного сравнения фаз в смежных точках фазового поля. При наличии шумов фиксируются ложные фазовые переходы. Ошибочное определение фазового перехода приводит к распространению и накоплению ошибок по всей области поля, что приводит к неверной интерпретации формы восстановленного фазового профиля. Для устранения этих ошибок используются различные подходы, основанные на методах локальной и глобальной оптимизации, теории сигналов, обработки изображений, динамического программирования, статистических подходов к оценке вероятностей фазовых переходов, эвристических алгоритмов, искусственного интеллекта, комбинирования различных методов [1, 2].

В [3, 4] приведен метод восстановления абсолютных значений измеряемой величины по значениям нескольких измерений в пределах различных периодов. Если значения этих периодов соотносятся как взаимно простые числа, то максимальный диапазон абсолютных значений определяется произведением значений, поставленных в соответствие периоду. В литературе этот метод получил название G-S алгоритм [5–8]. Достоинствами метода является возможность устранения фазовой неоднозначности в каждой точке независимо от других и существенное увеличение динамического диапазона.

Исходными данными являются результаты измерений одной и той же величины  $L$  при различных значениях периодов –  $m_1$  и  $m_2$ . Если измеренные в пределах периода значения  $b_1$  и  $b_2$  отложить по осям вертикали и горизонтали, можно получить таблицу, значения которой будут удовлетворять абсолютным значениям искомой измеряемой величины. В общем случае, абсолютная величина  $L$  является решением системы сравнений

$$\begin{cases} L \equiv b_1 \pmod{m_1} \\ L \equiv b_2 \pmod{m_2} \end{cases} \quad (1)$$

Максимальный диапазон однозначного определения абсолютных значений определяется наибольшими взаимно простыми сомножителями в значениях периодов. Если  $m_1$  и  $m_2$  – взаимно простые числа, то максимальный диапазон равен произведению  $m_1$  на  $m_2$ .

Недостаток метода: он неустойчив. Даже небольшие погрешности при измерениях начальных фазовых значений приводят к значительным ошибкам при определении полной фазы, поэтому широкого распространения метод не получил.

В этой статье нами предлагается новый способ решения системы сравнений на основе геометрического подхода, который позволяет учесть погрешность измерений и преодолеть проблему неустойчивости решений.

## II. МОДУЛЯРНАЯ АРИФМЕТИКА

Метод модулярной арифметики состоит в том, чтобы оперировать не непосредственно числом  $a$ , а его остатками от деления на некоторые числа  $m_i$ .

$$\begin{aligned} b_1 &= a \pmod{m_1}, \\ b_2 &= a \pmod{m_2}, \\ &\dots, \\ b_k &= a \pmod{m_k}. \end{aligned} \quad (2)$$

Числа  $(b_1, b_2, \dots, b_k)$  легко вычислить делением числа  $a$  на простые целые числа  $m_i$ . И наоборот, зная  $(b_1, b_2, \dots, b_k)$ , можно при некоторых условиях всегда восстановить  $a$ . Поэтому  $(b_1, b_2, \dots, b_k)$  можно рассматривать как новый тип представления числа  $a$ .

Преимущество модулярного представления в том, что операции сложения, вычитания и умножения выполняются очень просто [9]:

$$(b_1, b_2, \dots, b_k) + (c_1, c_2, \dots, c_k) =$$

$$\begin{aligned}
 &=(b_1 + c_1) \bmod m_1, \dots, (b_k + c_k) \bmod m_k \\
 &\quad (b_1, b_2, \dots, b_k) - (c_1, c_2, \dots, c_k) = \quad (3) \quad \dots \\
 &=(b_1 - c_1) \bmod m_1, \dots, (b_k - c_k) \bmod m_k \\
 &\quad (b_1, b_2, \dots, b_k) * (c_1, c_2, \dots, c_k) = \\
 &=(b_1 * c_1) \bmod m_1, \dots, (b_k * c_k) \bmod m_k
 \end{aligned}$$

Если предусмотрена возможность параллельного выполнения операций, применение модулярной арифметики дает значительное преимущество. Операции, связанные с разными модулями, могут выполняться одновременно, что приводит к сокращению времени их выполнения. Однако существует ряд недостатков модулярного представления, которые ограничивают его использование.

1. Трудно проверить является число в модулярном представлении большим или меньшим, чем другое.
2. Трудно проверить возникло ли переполнение в результате математической операции.
3. Сложно выполнить операцию деления.

Поэтому применение модулярной арифметики оправдано только в том случае, если существуют быстрые алгоритмы перехода от модулярного представления к позиционному и обратно.

Для нахождения числа по набору остатков можно использовать «китайскую» теорему об остатках. Частный случай этой теоремы был сформулирован китайским математиком Сунь Цю (между 280 и 473 г. н. э.). Примерно в это же самое время греческий математик Никомах сформулировал тот же частный случай. Известны также работы математиков средневековой Индии, посвященные этой проблеме. В общем виде теорема была сформулирована и доказана Чин Чжу-Шао (*Jiushao Qin*) (1247 г.).

Существует несколько формулировок китайской теоремы. Приведем одну из них [10].

Пусть каждому целому числу отвечает определенный остаток от деления на целое положительное  $m$ , который называется модулем. Если двум целым  $a$  и  $b$  отвечает один и тот же остаток  $r$ , то они называются равноостаточными по модулю  $m$ . Сравнимость записывается как

$$a \equiv b \pmod{m}, \quad (4)$$

где знак ( $\equiv$ ) обозначает сравнение.

Числа сравнимые по модулю  $m$ , образуют класс чисел по модулю  $m$ . Любое число класса называется вычетом по модулю  $m$ . Вычет, равный самому остатку  $r$ , называется наименьшим неотрицательным вычетом. Взяв от каждого класса по одному вычету, получим полную систему вычетов по модулю  $m$ . Чаще всего в качестве полной системы вычетов используют наименьшие неотрицательные вычеты  $0, 1, \dots, m-1$ .

Рассмотрим систему сравнений первой степени с одним неизвестным:

$$\begin{aligned}
 x &\equiv b_1 \pmod{m_1} \\
 x &\equiv b_2 \pmod{m_2}
 \end{aligned}$$

Если модули являются взаимно простыми числами, то в некотором диапазоне существует единственное решение. Найти это решение можно воспользовавшись следующей теоремой.

**Теорема.**

Пусть числа  $M_S$  и  $N_S$  определены из условий

$$m_1 m_2 \dots m_k = M_S m_S, \quad (6)$$

$$M_S N_S \equiv 1 \pmod{m_S}, \quad (7)$$

и пусть

$$X_0 = M_1 N_1 b_1 + M_2 N_2 b_2 + \dots + M_k N_k b_k. \quad (8)$$

Тогда совокупность значений  $X$ , удовлетворяющих системе сравнений (5), определяется сравнением

$$X \equiv X_0 \pmod{m_1 m_2 \dots m_k}. \quad (9)$$

Для перехода от модулярного представления к позиционной системе можно воспользоваться выражением (8). В диапазоне, определяемом произведением взаимно простых модулей  $m_1 m_2 \dots m_k$  решение будет единственным. Коэффициенты  $M_i$  можно найти из равенства (6),  $N_i$  из сравнения (7). Решить сравнение (7) можно или простым перебором от 1, 2, 3 и т.д. до первого, удовлетворяющего значения, или воспользовавшись обобщенным алгоритмом Евклида [10]. Время для нахождения этих коэффициентов не важно, поскольку обычно мы работаем с системой с одним и тем же набором модулей и эту операцию надо выполнить один раз.

Однако вычисление с помощью выражения (8) требует  $k$  умножение и  $k-1$  сложений для набора из  $k$  модулей. Кроме того, при вычислении необходимо переходить от вычислений с небольшим числом разрядов (определяемых соответствующими значениями модулей) к вычислениям многократной точности, что снижает область применения модулярных вычислений.

Ниже описывается быстрый алгоритм перевода чисел из модулярного представления к позиционной системе представления на основе геометрического подхода.

**III. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ**

Можно представить геометрическое истолкование одного сравнения (4). Пусть  $m$  для определенности равно 7. Представим себе, что числовая прямая целых чисел накручена на окружность длины 7, так, что числа 7, 14, 21, и т. д. попадают на нулевую точку, числа 1, 8, 15, ... , а также -6, -13, -20, совмещаются со следующей целочисленной точкой окружности и т. д. [11], как показано на *Рис. 1*.

Рассмотрим, как выглядит геометрическое представление решения системы сравнений при двух модулях.

Рассмотрим случай для двух взаимно

простых модулей. Например:  $m_1 = 11, m_2 = 17$ . В этом случае:  $M_1 = 17, M_2 = 11, N_1 = 2, N_2 = 14$ .

$$X_0 = M_1 N_1 b_1 + M_2 N_2 b_2 \pmod{m_1 m_2}, \quad (10a)$$

$$X = 17 \cdot 2 b_1 + 11 \cdot 14 b_2 \pmod{11 \cdot 17}, \quad (10b)$$

или

$$X = 34 b_1 + 154 b_2 \pmod{187}. \quad (10c)$$

В этом случае таблица всех возможных результатов (таблица решений) будет иметь следующий вид (Рис. 2).

Видно, что числа возрастают от 0 до  $m_1 - 1$  последовательно по главной диагонали, а затем по диагоналям, показанным на Рис. 2.

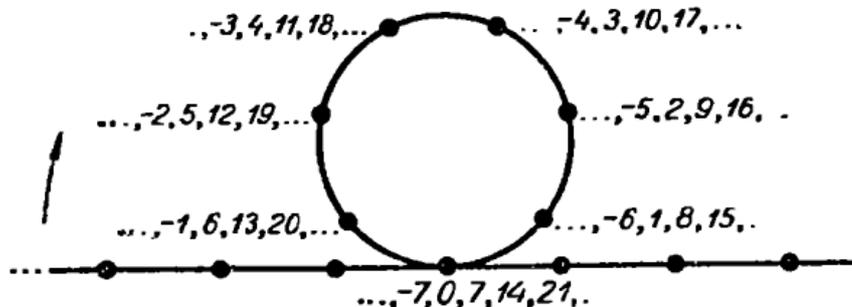


Рис. 1. Геометрическое представление сравнения  $a \equiv b \pmod{7}$

b2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
b1	0	14	11	8	5	2	16	13	10	7	4	1	15	12	9	6	3	
0	3	0	154	121	88	55	22	176	143	110	77	44	11	165	132	99	66	33
1	6	34	1	155	122	89	56	23	177	144	111	78	45	12	166	133	100	67
2	9	68	35	2	156	123	90	57	24	178	145	112	79	46	13	167	134	101
3	12	102	69	36	3	157	124	91	58	25	179	146	113	80	47	14	168	135
4	15	136	103	70	37	4	158	125	92	59	26	180	147	114	81	48	15	169
5	1	170	137	104	71	38	5	159	126	93	60	27	181	148	115	82	49	170
6	4	17	171	138	105	72	39	6	160	127	94	61	28	182	149	116	83	171
7	7	51	18	172	139	106	73	40	7	161	128	95	62	29	183	150	117	172
8	10	85	52	19	173	140	107	74	8	162	129	96	63	30	184	151	118	173
9	13	119	86	53	20	174	141	108	75	42	9	163	130	97	64	31	185	152
10	16	153	120	87	54	21	175	142	109	76	43	10	164	131	98	65	32	186

Рис. 2. Последовательное изменение чисел в таблице решений системы сравнений (10c);  $b_1$  меняется от 0 до 10,  $b_2$  от 0 до 12

Если непрерывно соединить продолжения диагоналей при последовательном возрастании чисел можно заметить, что при склейке верхней и нижней горизонтальных строк и левого и правого столбца образуется тор (Рис. 3а).

Разрежем тор вдоль одного из своих меридианов. Тогда он превращается в круговой цилиндр с двумя краевыми окружностями. Закрепим неподвижно одну окружность и станем закручивать цилиндр вокруг себя так, чтобы вторая окружность сделала  $k$ -оборотов. Всякая прямолинейная образующая цилиндра при этом обратится в винтовую линию, обходящую ось

цилиндра  $k$ -раз. Если снова склеить оба края, то получим топологическое отображение тора на самого себя. При таком отображении тора, параллели тора превратились в винтообразные кривые и наоборот [12].

Решения системы сравнений последовательно будут возрастать по спирали на поверхности тора (Рис. 3б) от 0 до  $m_1 m_2$ .

Задачу перевода чисел из модулярного представления к позиционному можно свести к определению начального значения витка тора и числа точек на этом витке.

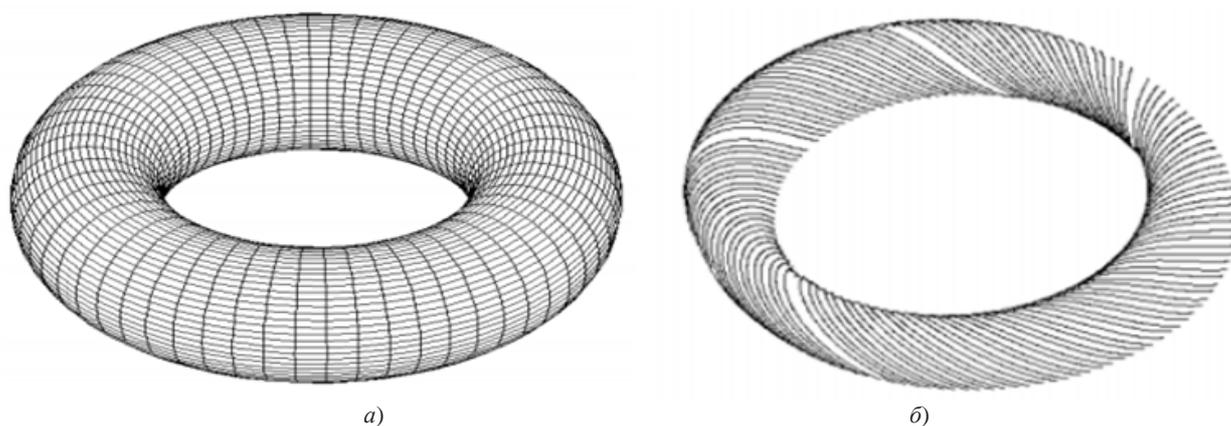


Рис. 3. Иллюстрация метода: а – тор, образующийся в результате склейки таблицы решений; б – последовательное возрастание чисел по диагоналям в таблице решений при отображении на поверхность двумерного тора

Для удобства мы вычисляем начальные значения на витках тора. Это число равно целому числу витков, умноженному на размер витка. В нашем случае размер витка  $m_1 = 11$ . Тогда сразу же можно определить само число  $X$

$$X = n[i] m_1 + b_1. \quad (11)$$

Для нахождения числа витков (2 строка и 2 столбец в таблице на Рис. 2) можно воспользоваться следующим выражением, которое следует из (10а):

$$n[i] = M_2 N_2 i \pmod{m_1 m_2} = N_2(i) \pmod{m_2}, \quad \text{если } i = b_2 - b_1 \geq 0 \quad (12a)$$

или для конкретного случая: ( $m_1 = 11, m_2 = 17, M_1 = 17, M_2 = 11, N_1 = 2, N_2 = 14$ ).

$$n(i) = 14 i \pmod{17}. \quad (12b)$$

Для случая, когда  $b_2 - b_1 < 0$ , таблицу решений можно представить в виде, в котором значения ниже 0 диагонали симметрично отображаются (Рис. 4).

Выражение (12а) перепишем в виде

$$n[i] = N_2 \cdot (b_2 - b_1) \pmod{m_2}, \quad \text{если } b_2 - b_1 \geq 0 \quad (13a)$$

$$n[i] = N_2 \cdot (b_2 - b_1 + m_2) \pmod{m_2}, \quad \text{если } b_2 - b_1 < 0 \quad (13b)$$

	b2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
b1	0	14	11	8	5	2	16	13	10	7	4	1	15	12	9	6	3	
0	3	0	154	121	88	55	22	176	143	110	77	44	11	165	132	99	66	33
1	6	34	1	155	122	89	56	23	177	144	111	78	45	12	166	133	100	67
2	9	68	35	2	156	123	90	57	24	178	145	112	79	46	13	167	134	101
3	12	102	69	36	3	157	124	91	58	25	179	146	113	80	47	14	168	135
4	15	136	103	70	37	4	158	125	92	59	26	180	147	114	81	48	15	169
5	1	170	137	104	71	38	5	159	126	93	60	27	181	148	115	82	49	16
6	4	17	171	138	105	72	39	6	160	127	94	61	28	182	149	116	83	50
7	7	51	172	139	106	73	40	7	161	128	95	62	29	183	150	117	84	51
8	10	85	52	173	140	107	74	41	8	162	129	96	63	30	184	151	118	85
9	13	119	86	53	28	174	141	108	75	42	9	163	130	97	64	31	185	152
10		153	120	87	54	21	175	142	109	76	43	10	164	131	98	65	32	186

Рис. 4. Определение числа витков на поверхности тора. На рис. 5 показаны 0 и 1 витки

Можно представить выражения (13) в следующем виде

$$n[i] = (N_2 \cdot i) \pmod{m_2}, \quad (14)$$

где

$$i = b_2 - b_1, \quad \text{если } b_2 - b_1 \geq 0$$

$$i = b_2 - b_1 + m_2, \quad \text{если } b_2 - b_1 < 0$$

Выражение (12) для определения значений

чисел в таблице решений в этом случае будет выглядеть как

$$X = (N_2 \cdot (b_2 - b_1) \pmod{m_2}) \cdot m_1 + b_1, \quad (15a)$$

$$\text{если } b_2 - b_1 \geq 0$$

$$X = (N_2 \cdot (b_2 - b_1 + m_2) \pmod{m_2}) \cdot m_1 + b_1, \quad (15b)$$

$$\text{если } b_2 - b_1 < 0$$

или

$$X = \{N_2 \cdot [(b_2 - b_1) \bmod m_2] \bmod m_2\} \cdot m_1 + b_1, \quad (16)$$

#### IV. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОДУЛЯРНОЙ АРИФМЕТИКИ ДЛЯ УСТРАНЕНИЯ ФАЗОВОЙ НЕОДНОЗНАЧНОСТИ ПРИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Основной задачей при анализе интерференционных картин является определение разности фаз  $\varphi(x, y)$  по значениям зарегистрированных интенсивностей  $I_i(x, y)$ .

При различных фазовых сдвигах  $\delta_i$  интенсивность отраженного от объекта света можно представить в виде

$$I_i(x, y) = A_0(x, y) (1 + V(x, y) \cos(\varphi(x, y) + \delta_i)), \quad (17)$$

где  $A_0(x, y)$  - средняя яркость, а  $V(x, y)$  - контраст изображения,  $i=1, 2 \dots m$ , при этом  $m$  - число фазовых сдвигов.

В [13-15] приведен обобщенный алгоритм расшифровки, который при известных значениях  $\delta_i$ , позволяет определить значение фазового распределения  $\varphi(x, y)$ . В [16-19] приведен способ решений системы уравнений (1) при неизвестных значениях  $\delta_i$ . Значения  $\varphi(x, y)$  будут меняться от 0 до  $2\pi$ .

В результате мы имеем результаты косвенных измерений параметров объекта в зависимости от цены полосы  $m$ , которая является параметром определяемым схемой интерферометра.

$$b_i(x, y) = \frac{\varphi(x, y)}{2\pi} m_i \quad (18)$$

Если изменить значение цены полосы, и повторить измерения (4-1), то мы получим серию значений измеряемой величины  $(b_1, b_2, \dots, b_k)$ . Каждое значение определяется в диапазоне от 0 до  $m_i - 1$ .

Абсолютная величина  $L$  может быть найдена как решение системы сравнений

$$\begin{cases} L \equiv b_1 \pmod{m_1} \\ L \equiv b_2 \pmod{m_2} \end{cases} \quad (19)$$

При этом максимальный диапазон однозначного определения значений определяется наибольшими взаимно простыми множителями в значениях цен полос.

Цена полосы может меняться либо изменением длины волны, либо изменением угла между интерферирующими полосами, либо изменением коэффициента преломления среды. При использовании методов голографической интерферометрии это может быть достигнуто методом двух длин волн, методом смещенного источника и иммерсионным методом [20].

Таким образом, задача расширения диапазона измерений сводится к задаче решения системы сравнений (19).

Однако решение системы сравнений задача неустойчивая. Даже небольшие погрешности при измерениях начальных значений  $b_i$  приводят к значительным ошибкам при определении полного значения измеряемой величины.

На *Рис. 5* показаны результаты реальных измерений методом структурированного освещения [21, 22] при двух ценах полос  $m_1 = 167$ ,  $m_2 = 241$ .

Видно, что из реальные измерения достаточно сильно отличаются от идеальных. Это связано с нарушением синусоидальности проецируемых полос, неравномерностью освещения и другими факторами при проведении эксперимента. Однако использование геометрического подхода позволяет восстановить полную фазу даже для такого случая.

Рассмотрим фрагмент таблицы решения (*Рис. 6*) с модулями  $m_1=53$  и  $m_2=63$ . В этом случае максимальный диапазон может составить  $53 \cdot 63 = 3339$ .

Если ограничить максимальный диапазон измерений, это приведет к тому, что в таблице появятся разреженные диагонали. На этих диагоналях будут лежать значения абсолютных величин, попадающие в выбранный диапазон, а значения между диагоналями будут лежать за пределами этого диапазона.

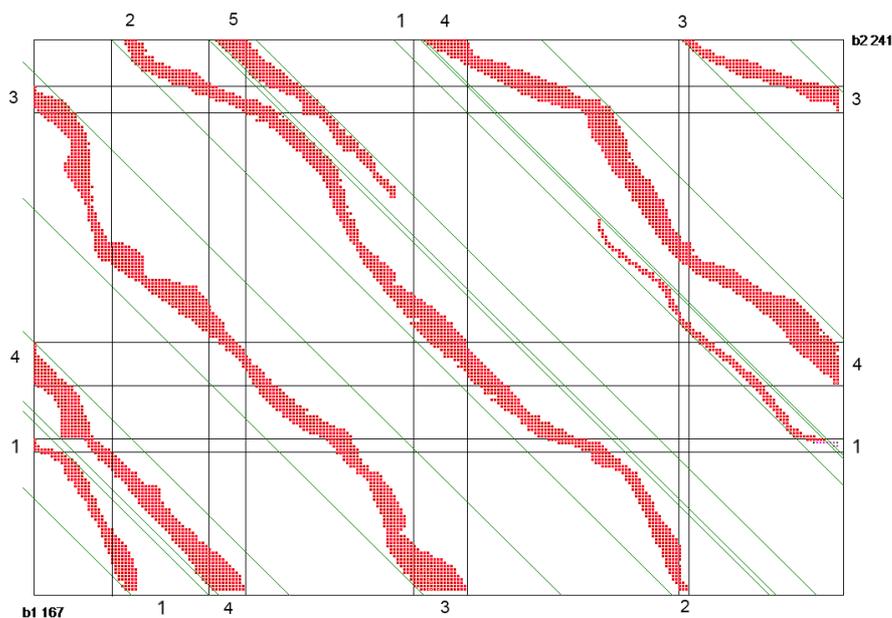


Рис. 5. Таблица решений с модулями  $m_1=167$  и  $m_2=241$

b2	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
b1	0	1537	3074	1219	2756	901	2438	583	2120	265	1802	3339	1484	3021	1166	2703	848	2385	530	2067	212	1749	3286	1431	2968	1113	2650	795	2332	477	2014	159	169
1	1856	1	1538	3075	1220	2757	902	2439	584	2121	266	1803	3340	1485	3022	1167	2704	849	2386	531	2068	213	1750	3287	1432	2969	1114	2651	796	2333	478	2015	160
2	320	1857	2	1539	3076	1221	2758	903	2440	585	2122	267	1804	3341	1486	3023	1168	2705	850	2387	532	2069	214	1751	3288	1433	2970	1115	2652	797	2334	479	2016
3	2176	321	1858	3	1540	3077	1222	2759	904	2441	586	2123	268	1805	3342	1487	3024	1169	2706	851	2388	533	2070	215	1752	3289	1434	2971	1116	2653	798	2335	480
4	640	2177	322	1859	4	1541	3078	1223	2760	905	2442	587	2124	269	1806	3343	1488	3025	1170	2707	852	2389	534	2071	216	1753	3290	1435	2972	1117	2654	799	2336
5	2496	641	2178	323	1860	5	1542	3079	1224	2761	906	2443	588	2125	270	1807	3344	1489	3026	1171	2708	853	2390	535	2072	217	1754	3291	1436	2973	1118	2655	800
6	960	2497	642	2179	324	1861	6	1543	3080	1225	2762	907	2444	589	2126	271	1808	3345	1490	3027	1172	2709	854	2391	536	2073	218	1755	3292	1437	2974	1119	2656
7	2816	961	2498	643	2180	325	1862	7	1544	3081	1226	2763	908	2445	590	2127	272	1809	3346	1491	3028	1173	2710	855	2392	537	2074	219	1756	3293	1438	2975	1120
8	1280	2817	962	2499	644	2181	326	1863	8	1545	3082	1227	2764	909	2446	591	2128	273	1810	3347	1492	3029	1174	2711	856	2393	538	2075	220	1757	3294	1439	2976
9	3136	1281	2818	963	2500	645	2182	327	1864	9	1546	3083	1228	2765	910	2447	592	2129	274	1811	3348	1493	3030	1175	2712	857	2394	539	2076	221	1758	3295	1440
10	1600	3137	1282	2819	964	2501	646	2183	328	1865	10	1547	3084	1229	2766	911	2448	593	2130	275	1812	3349	1494	3031	1176	2713	858	2395	540	2077	222	1759	3296
11	84	1601	3138	1283	2820	965	2502	647	2184	329	1866	11	1548	3085	1230	2767	912	2449	594	2131	276	1813	3350	1495	3032	1177	2714	859	2396	541	2078	223	1760
12	1920	85	1602	3139	1284	2821	966	2503	648	2185	330	1867	12	1549	3086	1231	2768	913	2450	595	2132	277	1814	3351	1496	3033	1178	2715	860	2397	542	2079	224

Рис.6. Фрагмент таблицы решения с модулями  $m_1=53$  и  $m_2=63$ . В таблице выделены диагонали, значения на которых меньше 300.

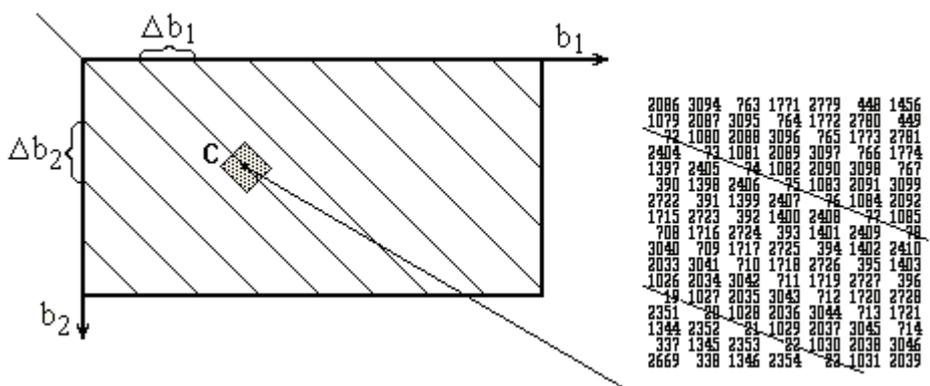


Рис. 7. Таблица решений с модулями  $m_1=53$  и  $m_2=63$  (справа увеличенная часть таблицы с численными значениями).

Если представить всю таблицу решений (Рис. 7), то значения  $b_1$  и  $b_2$  увеличиваются последовательно по основным диагоналям. На рисунке закрашена область (область грубых промахов), в которую может попасть измеряемая величина при наличии погрешности измерений.

Видно, что ближайшая точка, расположенная на допустимой диагонали, вероятно и будет правильным значением. Для правильного определения абсолютного значения величины  $L$  необходимо, чтобы погрешность исходных данных не превышала половины расстояния



Начальная часть таблицы решений (21с) показана на *Рис. 9*.

В таблице первая строка определяет число витков, которое будет определяться как

$$n(i) = N_2^2 \cdot i \bmod (m_2 m_3), \quad (22)$$

где  $i = b_2^3$ .

В разделе, в котором рассматривался двумерный случай (16), показано, что решение

(21) для двумерного случая можно представить в виде:

$$X = M_2^2 \{ N_2^2 \cdot [(b_2^3 - b_1) \bmod (m_2 m_3)] \bmod (m_2 m_3) \} + b_1 \quad (22a)$$

или

$$X = \{ N_2^2 \cdot [(b_2^3 - b_1) \bmod (m_2 m_3)] \bmod (m_2 m_3) \} \cdot m_2 + b_1 \quad (22b)$$

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
$b_2$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	0	1	2	3	4	5	6
$b_1$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	0	2211	1991	1771	1551	1331	1111	8911	671	-451	231	11	2222	2002	1782	1562	1342	1122	902	682	462	242	22	2233	2013	1793	1573	1353	1133	913	693	473	253
1	221	1	2212	1992	1772	1552	1332	1112	892	-672	452	232	12	2223	2003	1783	1563	1343	1123	903	683	463	243	23	2234	2014	1794	1574	1354	1134	914	694	474
2	442	222	2	2213	1993	1773	1553	1333	1113	893	673	453	233	13	2224	2004	1784	1564	1344	1124	904	684	464	244	24	2235	2015	1795	1575	1355	1135	915	695
3	663	443	223	3	2214	1994	1774	1554	1334	1114	894	674	454	234	14	2225	2005	1785	1565	1345	1125	905	685	465	245	25	2236	2016	1796	1576	1356	1136	916
4	884	664	444	224	4	2215	1995	1775	1555	1335	1115	895	675	455	235	15	2226	2006	1786	1566	1346	1126	906	686	466	246	26	2237	2017	1797	1577	1357	1137
5	1105	885	665	445	225	5	2216	1996	1776	1556	1336	1116	896	676	456	236	16	2227	2007	1787	1567	1347	1127	907	687	467	247	27	2238	2018	1798	1578	1358
6	1326	1106	886	666	446	226	6	2217	1997	1777	1557	1337	1117	897	677	457	237	17	2228	2008	1788	1568	1348	1128	908	688	468	248	28	2239	2019	1799	1579
7	1547	1327	1107	887	667	447	227	7	2218	1998	1778	1558	1338	1118	898	678	458	238	18	2229	2009	1789	1569	1349	1129	909	689	469	249	29	2240	2020	1800
8	1768	1548	1328	1108	888	668	448	228	8	2219	1999	1779	1559	1339	1119	899	679	459	239	19	2230	2010	1790	1570	1350	1130	910	690	470	250	30	2241	2021
9	1989	1769	1549	1329	1109	889	669	449	229	9	2220	2000	1780	1560	1340	1120	900	680	460	240	20	2231	2011	1791	1571	1351	1131	911	691	471	251	31	2242
10	2210	1990	1770	1550	1330	1110	890	670	450	230	10	2221	2001	1781	1561	1341	1121	901	681	461	241	21	2232	2012	1792	1572	1352	1132	912	692	472	252	32

*Рис. 9.* Начальная часть таблицы решений (21с). ( $b_2^3$  меняются от 0 до 220).

Теперь нужно определить зависимость  $b_2^3$  от  $b_2$  и  $b_3$ . Проанализировав таблицу решений на *Рис. 8* и *Рис. 9* можно заметить, что для одинаковых решений эти значения будут распределены так, как показано во второй и третьей строке таблицы на *Рис. 9*.

В этом случае

$$b_2^3 = M_1^{23} N_1^{23} b_2 + M_2^{23} N_2^{23} b_3 \pmod{m_2 m_3}. \quad (24)$$

и

$$M_1^{23} = 17, M_2^{23} = 13, N_1^{23} = 10, N_2^{23} = 4,$$

$$b_2^3 = M_2^{23} \{ N_2^{23} \cdot [(b_3 - b_2) \bmod (m_2)] \bmod (m_2) \} + b_2 \quad (25a)$$

или

$$b_2^3 = \{ N_2^{23} \cdot [(b_3 - b_2) \bmod (m_2)] \bmod (m_2) \} \cdot m_2 + b_2 \quad (25b)$$

Эти решения показаны в таблице на *Рис. 10*.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
0	0	52	104	156	208	39	91	143	195	26	78	130	182	13	65	117	169
1	170	1	53	105	157	209	40	92	144	196	27	79	131	183	14	66	118
2	119	171	2	54	106	158	210	41	93	145	197	28	80	132	184	15	67
3	68	120	172	3	55	107	159	211	42	94	146	198	29	81	133	185	16
4	17	69	121	173	4	56	108	160	212	43	95	147	199	30	82	134	186
5	187	18	70	122	174	5	57	109	161	213	44	96	148	200	31	83	135
6	136	100	19	71	123	175	6	58	110	162	214	45	97	149	201	32	84
7	85	137	189	20	72	124	176	7	59	111	163	215	46	98	150	202	33
8	34	86	138	190	21	73	125	177	8	60	112	164	216	47	99	151	203
9	204	35	87	139	191	22	74	126	178	9	61	113	165	217	48	100	152
10	153	205	36	88	140	192	23	75	127	179	10	62	114	166	218	49	101
11	102	154	206	37	89	141	193	24	76	128	180	11	63	115	167	219	50
12	51	103	155	207	38	90	142	194	25	77	129	181	12	64	116	168	220

*Рис. 10.* Определение  $b_2^3$  по  $b_2$  (от 0 до 12) и  $b_3$  (от 0 до 16).

Таким образом, решение для трех модулей можно записать как

$$X = \{ N_2^2 \cdot [(b_2^3 - b_1) \bmod (m_2 m_3)] \bmod (m_2 m_3) \} \cdot m_2$$

$$m_3 + b_1, \quad (26a)$$

или

$$X = \{(N_2^2 \cdot i) \bmod (m_2 m_3)\} m_2 m_3 + b_1, \quad (26b)$$

$$i = b_2^3 - b_1, \quad \text{если } b_2^3 - b_1 \geq 0$$

$$i = b_2^3 - b_1 + m_2 m_3, \quad \text{если } b_2^3 - b_1 < 0$$

где

$$b_2^3 = \{N_2^{23} \cdot [(b_3 - b_2) \bmod (m_2)] \bmod (m_2)\} m_2 + b_2, \quad (27a)$$

или

$$b_2^3 = \{(N_2^{23} \cdot i) \bmod (m_2)\} m_2 + b_2, \quad (27b)$$

$$i = b_3 - b_2, \quad \text{если } b_3 - b_2 \geq 0$$

$$i = b_3 - b_2 + m_2, \quad \text{если } b_3 - b_2 < 0$$

Коэффициенты  $N_2^2$  и  $N_2^{23}$  рассчитываются следующим образом

$$m_1 N_2^2 \equiv 1 \pmod{m_2 m_3}, \quad (28a)$$

$$m_2 N_2^{23} \equiv 1 \pmod{m_3}. \quad (28b)$$

Заметим, что в таблице решений (рис.9) значения последовательно увеличиваются по главным диагоналям. Поэтому при наличии погрешностей при измерениях начальных значений ( $b_1, b_2, b_3$ ) всегда можно ограничить диапазон (количество витков) для выделения окрестности грубых сбоев.

Ошибочные результаты, которые попадают в окрестность грубых сбоев, могут быть скорректированы к ближайшим диагоналям. Устранение этих ошибок может привести к значительному увеличению точности измерений. Таким образом, использование модулярной арифметики позволит не только увеличить диапазон измерений, но и снизить погрешность.

## VI. ВЫВОДЫ

Реализован новый алгоритм перевода чисел из модулярного к позиционному представлению на основе геометрического подхода. В статье рассмотрены двумерный (решение системы сравнений с двумя модулями) и трехмерный случаи. Обобщение на многомерный случай с помощью процедуры предложенной в работе для трехмерного случая не представляет существенных сложностей.

Представление таблицы решений в виде многомерного тора позволяет упростить алгоритм перехода к позиционной системе. В этом случае, мы переходим от многомерной задачи к двумерной. Для этого необходимо определить число витков и найти положение на этом витке. Кроме того, при ограничении числа витков (при ограничении максимального диапазона) витки становятся разреженными, появляются окрестности грубых сбоев, которые позволяют скорректировать измерительные

погрешности.

В результате метод устранения фазовой неоднозначности становится устойчивым и его можно использовать при реальных интерференционных измерениях.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по гранту № 14-08-01100 «Цифровая голографическая система реального времени для экспериментального исследования напряженно-деформированного состояния динамических объектов».

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] D. Ghiglia and M. Pritt, Two-dimensional phase unwrapping theory, algorithms and software, John Wiley & Sons, 1998. 512 p.
- [2] F. Qiangian, P.M. Meaney, and K.D. Paulsen, "The multidimensional phase unwrapping Integral and applications to microwave tomographical image reconstruction," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 15, No. 11, 2006. pp. 3311-24.
- [3] V.I. Gushov, Yu.N. Solodkin Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers// Optics and Lasers in Engineering.-1991.-Vol.14, Issues 4-5,- P.311-324.
- [4] V.I. Guzhov, S.P. Il'inykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov /Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- March 2013, Volume 49, Issue 2, pp 178-183.
- [5] Wengierow, M., Salbut, L., Ramotowski, Z., Szumski, R., Szykiedans, K. Measurement System Based on Multi-Wavelength Interferometry for Long Gauge Block Calibration Metrology and Measurement Systems. - 2013. - Volume XX, Issue 3, pp. 479-49.
- [6] Zhong, J., Zhang, Y. Absolute phase-measurement technique based on number theory in multifrequency grating projection profilometry. - Applied Optics. - 2001. - Vol.40, No.4 - pp.492-500.
- [7] Kujawińska, M., Osten, W. Fringe pattern analysis methods: up-to-date review. - Proc. SPIE.-1998. - Vol. 3407, p. 56-66.
- [8] Takeda, M., Gu, Q., Kinoshita, M., Takai, H., Takahashi, Y. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: A single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations - Applied Optics - 1997 - Vol.36, No.22 - pp. 5347-5354.
- [9] Дональд Э. Кнут "Искусство программирования. Том 2. Получисленные алгоритмы".- Третье издание.-М., 2007, 832 с.
- [10] Виноградов И.М. Основы теории чисел - М: Главная редакция физико-технической литературы изд-ва "Наука".- 1972.- 168с.
- [11] Арнольд И.В. Теоретическая арифметика - М: Государственное учебно-педагогическое из-во.- 1938.- 480с.
- [12] Гильберт Д., Кон\_Фоссен С. Наглядная геометрия .- М.Наука.-1981.- 344с.
- [13] Гужов В.И., Ильиных С.П. Компьютерная интерферометрия. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - 252с.
- [14] Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. / Универсальный алгоритм расшифровки. // Научный вестник НГТУ. - 2010. - №4(41) - С. 51-58.
- [15] Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry /Guzhov V., Ilinykh S., Kuznetsov R., Haydukov D.// Optical Engineering, - 2013.-Vol.52(3) - pp. 030501-1 - 030501-2.
- [16] Гужов, В.И. Новый метод калибровки фазовых сдвигов [Текст] / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Д.С. Хайдуков, Р.А.

- Кузнецов // Научный вестник НГТУ. — 2013. — №1(50). — С. 185-189.
- [17] Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. // Устранение ошибок фазового сдвига в интерферометрии // Автотриметрия. - 2011. - Т. 47, №1.-С. 96-101.
- [18] V.I. Guzhov, S.P. Il'yinykh, D.S. Khaidukov and A.R. Vagizov Eliminating phase-shift errors in interferometry // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 2011., Vol.47, Nu.1.- pp. 76-80.
- [19] Определение значений фазовых сдвигов по интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии / Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.А., Хайдуков Д.С. // Автоматика и программная инженерия, Новосибирск, - 2013.-№1(3) – С. 10 – 15.
- [20] Козачок А.Г. Голографические методы исследований в экспериментальной механике.- М.: Машиностроение, 1984.- 176 л.
- [21] Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.А., Вагизов А.Р. / Решение проблемы фазовой неоднозначности методом целочисленной интерферометрии // Автотриметрия. - 2013. - Т. 49, №2.-С. 85-91.
- [22] V.I. Guzhov, S.P. Il'yinykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov /Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- March 2013, Volume 49, Issue 2, pp 178-183.



**Гужов Владимир Иванович** - профессор кафедры ССОД Новосибирского Государственного Технического университета, доктор технических наук. Он является автором более 160 научных работ. Область научных интересов: высокоточные интерференционные измерения, безошибочные вычисления, теория чисел.  
e-mail: [vig@nstu.edu.ru](mailto:vig@nstu.edu.ru)



**Кабак Евгений Семенович** - аспирант ССОД НГТУ. Область научных интересов: программная инженерия, оптические измерительные системы.  
e-mail: [vig@nstu.edu.ru](mailto:vig@nstu.edu.ru)



**Орлов Иван Сергеевич** - ассистент кафедры ССОД НГТУ. Область научных интересов: мультимедиа-технологии, оптические измерительные системы.  
e-mail: [mail@ivanorlov.com](mailto:mail@ivanorlov.com)

## The Use of Modular Arithmetic in Phase Measurements

V.I. GUZHOV, E.S. KABAK, I.S. ORLOV

*Abstract:* This paper gives a new algorithm for the transition from the modular representation of

numbers to the position, which can be used in phase measurements in real systems.

*Keywords:* Number theory, modular arithmetic, phase ambiguity, the interference measurement methods.

## REFERENCES

- [1] D. Ghiglia and M. Pritt, Two-dimensional phase unwrapping theory, algorithms and software, John Wiley & Sons, 1998. 512 p.
- [2] F. Qiangian, P.M. Meaney, and K.D. Paulsen, "The multidimensional phase unwrapping Integral and applications to microwave tomographical image reconstruction," IEEE Transactions on Image Processing, Vol. 15, No. 11, 2006. pp. 3311-24.
- [3] V.I. Gushov, Yu.N. Solodkin Automatic Processing of Fringe Patterns in Integer Interferometers// Optics and Lasers in Engineering.-1991.-Vol.14, Issues 4-5,- P.311-324.
- [4] V.I. Guzhov, S.P. Il'yinykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov /Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- March 2013, Volume 49, Issue 2, pp 178-183.
- [5] Wengierow, M., Salbut, L., Ramotowski, Z., Szumski, R., Szykiedans, K. Measurement System Based on Multi-Wavelength Interferometry for Long Gauge Block Calibration Metrology and Measurement Systems. - 2013. - Volume XX, Issue 3, p. 479-49.
- [6] Zhong, J., Zhang, Y. Absolute phase-measurement technique based on number theory in multifrequency grating projection profilometry. Applied Optics. 2001. Vol.40, No.4. p.492-500.
- [7] Kujawińska, M., Osten, W. Fringe pattern analysis methods: up-to-date review. Proc. SPIE.-1998. Vol. 3407, p. 56-66.
- [8] Takeda, M., Gu, Q., Kinoshita, M., Takai, H., Takahashi, Y. Frequency-multiplex Fourier-transform profilometry: A single-shot three-dimensional shape measurement of objects with large height discontinuities and/or surface isolations - Applied Optics . 1997. Vol.36, No.22 – p. 5347-5354.
- [9] Donal'd Je. Knut "Iskusstvo programmirovaniya. Vol 2. Poluchislennye algoritmy".- Tret'e izdanie.-M., 2007, 832 p.
- [10] Vinogradov I.M. Osnovy teorii chisel. M: Glavnaja redakcija fiziko-tehnicheskoy literatury izd-va "Nauka". 1972.- 168 p.
- [11] Arnol'd I.V. Teoreticheskaja arifmetika M: Gosudarstvennoe uchebno-pedagogicheskoe iz-vo. 1938. 480 p.
- [12] Gil'bert D., Kon\_Fossen S. Nagljadnaja geometrija. M.Nauka. 1981. 344 p.
- [13] Guzhov V.I., Il'inyh S.P. Komp'juternaja interferometrija. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2004. – 252p.
- [14] Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Hajdukov D.S., Vagizov A.R. Universal'nyj algoritm rasshifrovki. Nauchnyj vestnik NGTU. 2010. №4(41) p. 51-58.
- [15] Generic algorithm of phase reconstruction in phase-shifting interferometry. Guzhov V., Il'inykh S., Kuznetsov R., Hajdukov D. Optical Engineering, 2013. Vol.52(3) p. 030501-1 – 030501-2.
- [16] Guzhov, V.I. Novyj metod kalibrovki fazovyh sdvigo [Tekst]. V.I. Guzhov, S.P. Il'inyh, D.S. Hajdukov, R.A. Kuznecov. Nauchnyj vestnik NGTU. 2013. №1(50). p. 185-189.
- [17] Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Hajdukov D.S., Vagizov A.R.// Ustranenie oshibok fazovogo sdviga v interferometrii // Avtometrija. (Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing) 2011. T. 47, №1. p. 96-101.
- [18] V.I. Guzhov, S.P. Il'yinykh, D.S. Khaidukov and A.R. Vagizov Eliminating phase-shift errors in interferometry. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.- 2011., Vol.47, Nu.1. p. 76-80.
- [19] Opredelenie znachenij fazovyh sdvigo po

- interferencionnym kartinam v fazosdvigajushhej interferometrii. Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Kuznecov R.A., Hajdukov D.S. Avtomatika i programmaja inzhenerija, Novosibirsk, – 2013.-№1(3) p. 10 – 15.
- [20] Kozachok A.G. Golograficheskie metody issledovanij v jeksperimental'noj mehanike. M.: Mashinostroenie, 1984.- 176 l.
- [21] Guzhov V.I., Il'inyh S.P., Kuznecov R.A. , Vagizov A.R. Reshenie problemy fazovoj neodnoznachnosti metodom celochislennoj interferometrii. Avtometrija. - 2013. - T. 49, №2.-. 85-91.
- [22] V.I. Guzhov, S.P. Il'inykh, R.A. Kuznetsov, A.R. Vagizov. Solution of the problem of phase ambiguity by integer interferometry. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. March 2013, Volume 49, Issue 2, p. 178-183.

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

### **Содержание раздела:**

- В.А. Жмудь, Т.В. Печорина. О характерных правилах подготовки отчетов, обзоров и статей и диссертаций по техническим наукам. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 110–125. ФГБОУ ВПО НГТУ, (Новосибирск, Россия).

# О характерных правилах подготовки отчетов, обзоров и статей и диссертаций по техническим наукам

В.А. Жмудь, Т.В. Печорина  
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

**Аннотация:** Статья адресована студентам и аспирантам. Зрелым ученым общие правила подготовки статей и докладов кажутся очевидными, однако для студентов эти правила редко можно встретить в кратком и лаконичном изложении, при этом с достаточной аргументацией и в широком доступе. Кроме того, фундаментальные монографии на эту тему, как книги Батько [1] и подобные не всегда доступны и в некоторых вопросах устарели, поскольку правила, предъявляемые к диссертационным работам, изменяются, а в этих книгах указанные правила (и их удовлетворение) составляют существенную часть материала.

**Ключевые слова:** диссертация, технические науки, научный отчет, статья, научный обзор

## ВВЕДЕНИЕ

Даная работа не может претендовать на новизну или на непрерываемость выдвигаемых тезисов. И все же она видится полезной для молодых ученых, которые совершают ошибки, которые снижают общее положительное впечатление о проделанной работе. Учет некоторых предлагаемых правил поможет им сэкономить усилия и время, а также лучше представить работу в журнале или при защите диссертации. Но прежде всего мы рекомендуем внимательно изучить (а не просто прочесть) книгу Батько [1]. Также ознакомьтесь с другой цитируемой литературой [2–13].

Авторы будут признательны за замечания или дополнения по этому вопросу.

## 1. ПОДГОТОВКА НАУЧНЫХ СТАТЕЙ

### 1.1. Требования, предъявляемые к научным статьям

1. Оформление статьи должно строго соответствовать требованиям, выставленным на сайте журнала, в который направляется данная статья или публикуемым регулярно в первом или последнем номере данного журнала в разделе «Требования к рукописям» или с аналогичным названием. Изучите несколько статей данного журнала на близкую вам тематику, «пропитайтесь» стилем, языком, оформлением журнала, прежде чем писать свою

статью.

2. Научная проблематика статьи должна соответствовать профилю журнала, в который вы направляете свою статью. Авторы должны определить научную проблематику статьи, обозначив соответствующий УДК – условный код научной публикации по проблематике [2]. В сети *Internet* имеется доступный соответствующий классификатор, с которым авторы могут работать и выбирать по нему УДК представляемой статьи. Если статья соответствует нескольким УДК, то они пишутся через запятую, начиная с того, который, по мнению авторов, наиболее близок к тематике статьи.

3. Заглавие статьи должно строго соответствовать поставленной и решаемой задаче. Излишне общее заглавие не допускается, например «Управление многомерным объектом» или «Синтез адаптивных систем». Излишняя детализация, вызывающее излишнее количество слов в заголовке, также не желательна, заголовок из 14 слов и более, как правило, не желателен.

4. Аннотация к статье должна раскрывать более подробно, чем заголовок, суть статьи, т.е. цели, задачи, методы и результаты. Для образца следует выбрать лучшие аннотации в том журнале, куда вы готовите статью.

5. Ключевые слова или словосочетания (от 6 до 10) должны быть взяты из такого списка слов и терминов, которые использовали бы сами для поиска именно этой статьи, т.е. вы считаете, что при поиске статей по данным ключевым словам желательно, чтобы ищущий находил среди прочих и вашу статью.

6. Введение должно раскрывать актуальность проблемы, цели и решаемые задачи. Проблема актуальна не в том случае, если ей никто не занимается, а в том случае, если ее решение насущно требуется, но до настоящего времени не в полной мере достигнуто. Отсутствие публикаций на какую-либо тему или отсутствие результатов сами по себе не служат доказательством публикации (а иногда напротив ее опровергают). Недостаток публикаций с готовым решением задачи может частично подтверждать актуальность, если каким-то образом одновременно подтверждена

важность проблемы. Актуальность складывается из двух фактов: а) данную проблему необходимо решать; б) решать проблему следует именно сейчас (раньше решить ее было невозможно, не было технических или иных средств, а позже будет ее уже поздно решать, так как задержки с ее решением приводят к убыткам или опасности для экономики, техники и так далее).

7. Цели должны вытекать из проблемы. Цель не обязательно достигается данной единственной публикацией. Например, целью может служить расширение сфер применения какого-то метода или повышение точности и т.д. Задачи – это именно те результаты, которые достигаются в данной статье (диссертации, работе и т.д.). Поэтому поставленные во введении задачи должны быть решены в публикации. Также в конце публикации могут присутствовать выводы явно (в диссертации) или неявно (в статье) говорящие о том, что поставленные задачи полностью решены. В диссертации они перечисляются, и количество решенных задач и их содержание должно полностью совпадать с количеством и содержанием задач в начале диссертации. В статье перечисление решенных задач не применяют для краткости. Если в статье (диссертации) какая-то задача не решена, уберите ее из постановки, если в результате исследований решена дополнительная задача, внесите ее в постановку задач.

8. Недопустимо, чтобы статья содержала только постановку задачи и выводы (заключение). Между постановкой задачи и выводами требуется наличие содержательной части статьи, основной ее сути. Постановка целей и задач и выводы должны быть обрамлением этой содержательной части. Исключением из этого правила может служить статья, в заглавии которой присутствует фраза «постановка задачи». В этом случае поставленная задача должна быть принципиально новой, в статье должно содержаться весомое обоснование целесообразности решения этой задачи, описание трудностей и предложения по подходам к ее решению; научный вес такой статьи, как правило, не высок, статья может быть отнесена к разряду «призывы и увещевания». Хотя и тут могут быть исключения. Например, задачи по измерению скорости или частоты гравитационных волн обсуждаются в достаточно престижных журналах, понятно, что готового решения этой задачи в настоящий момент предложить научный мир пока еще не может.

9. Целесообразно указать методы решения поставленных задач во введении (хотя, строго говоря, это не обязательно).

10. Если работа выполнена по направлениям технических наук, то желательно, чтобы цели соответствовали прикладному характеру

исследований. Фундаментальные цели, безусловно, также могут ставиться, но уместны они больше в докторских диссертациях, а не в кандидатских, хотя запрета здесь быть не может. Главное, чтобы поставленные цели были увязаны с решаемыми и поэтому решенными задачами. Применяемые методы должны быть обязательно научными. Главные критерии научности – наличие и использование способа проверки выдвигаемых гипотез, возможность повторения и углубления этого способа, возможность повышения достоверности гипотез вследствие подтверждения их последующими исследованиями и научно-техническим развитием.

11. Научность методов иллюстрируется формулами (уравнениями), которые используются (а не просто приводятся в статье), и (или) иным инструментарием науки. Важнейший критерий научности состоит в повторяемости результатов. Если автор указал все условия эксперимента, в которых он получил новый результат, то теоретически любой исследователь может убедиться в правильности выводов, повторив этот эксперимент. По этому критерию трудно согласиться с научностью статей, в которых обсуждаются контролируемые перемещения во времени, искривления пространства, взрыв Вселенной и иные непроверяемые принципиально концепции, основывающиеся на 99% на домыслах и математических выкладках, оторванных от действительности, и на 1% на ошибочной трактовке широко известных экспериментов.

12. Обоснованность выводов иллюстрируется примерами моделирования или применения или иными графическими или численными иллюстрациями. Наличие иллюстраций облегчает читателям понимание сути статьи, задач и результатов. При иллюстрациях желательно использовать те формы, которые наиболее наглядны. Например, если теоретический график дан в виде частотных характеристик, а экспериментальные графики приведены в форме откликов на воздействия во временной области, то, очевидно, крайне трудно утверждать о совпадении теории и практики. Наилучшим вариантом было бы совмещение теоретического и экспериментального графиков в одинаковой форме, в одинаковом масштабе и в одних и тех же осях.

13. Формулы в некоторых случаях требуется нумеровать все, а в некоторых журналах нумеруют только те формулы, на которые в тексте имеются ссылки. Рисунки нумеруются все, если их более одного. Таблицы нумеруются все, если их более одной. Двойная нумерация в научной статье неуместна. В диссертации двойная нумерация допустима, тройная нумерация рисунков и таблиц не приветствуется ни в каких публикациях.

14. В статье необходимо использовать ссылки на другие научные публикации. Часть ссылок необходимо для подтверждения актуальности темы. Для этой цели не подходят ссылки на собственные публикации, и не слишком подходят публикации коллег из вашего коллектива и на труды научного руководителя. Требуются ссылки на работы других коллективов. Для диссертации желательны ссылки на другие диссертации в этой области. Также ссылки необходимы для доказательства вашего профессионализма, т.е. подтверждения того, что вами что-то прочитано в данной области, а именно – самые актуальные публикации, самые интересные, содержащие методы решения, близкие к тем, которые вы собираетесь описывать. Допускается давать ссылки и на собственные публикации, хотя такие ссылки не повышают вашего индекса цитирования, они все же позиционируют вас как специалиста в данной области. Ссылки на собственные работы, как правило, не должны превышать 25% общих ссылок. Крайне желательны ссылки не только на отечественные публикации, но и на зарубежные (которые приводятся на языке оригинала). Ссылки на журналы из перечня ВАК более желательны, но основным критерием является тот факт, что упоминание той или иной публикации должно быть обосновано текстом статьи.

15. Ссылки необходимы также для строгого разделения того, что сделано автором (авторами) от того, что «известно». Все, что не впервые обнаружится в данной статье – «известно». Применение слова «известно» всегда требует после окончания фразы или предложения соответствующей ссылки. Можно применять и иные обороты, например «Иванов отмечал...», «Петровым доказано...», «Сидоров впервые предложил...», «В справочнике приводится...». В том месте, где идет изложение оригинальных или модифицированных и впервые излагаемых идей, методов, результатов и т.п., текст должен быть таков, чтобы любому читателю было ясно, что излагаются новые и оригинальные результаты.

## 1.2. Рекомендации по написанию обзора

Следует определиться с шириной и с глубиной, с предметом, целями и задачами написания обзора.

Обзор пишется для обоснования «диссертательности» вашей работы. Этот обзор должен впоследствии послужить основой для написания введения в вашей диссертационной работе. Во введении вам будет необходимо обосновать «диссертательность» решенной вами задачи, которая состоит из актуальности темы, отсутствия готовых решений, сложности этих решений, научности применяемых вами методов, новизны полученных результатов и их практической полезности.

Ширина в данном случае характеризуется перечнем рассматриваемых источников статей, то есть перечнем журналов, научных публикаций в Интернете, патентов, сборников научных трудов, книг.

В силу того, что ВАК сформулировал перечень научных журналов, в которых рекомендуется опубликование научных результатов, полученных соискателями научных степеней кандидата и доктора наук, рекомендуется осуществлять поиск по этим журналам, а также стремиться к опубликованию результатов в этих журналах. Кроме того, следует рассматривать журналы, название или основная тематика которых явно соответствует теме научного исследования. Весьма желательно осуществлять также патентный поиск по классу, который соответствует теме исследований. Также в каждой области исследований существует ряд книг и учебников, которые знать аспирантам настоятельно необходимо. Особо отметим отношение к публикациям научного руководителя и научной школы, к которой относится соискатель. Одинаково плохо преобладание в обзорах ссылок на такие публикации и их отсутствие. Причем, в этом перечне соискатель должен ориентироваться наиболее четко, то есть не просто приводить ряд публикаций этой школы, а именно те, которые наиболее близки к теме исследований, наиболее существенны, наиболее новы и т. п. Если соискатель признает наиболее важными журналы из списка ВАК, логично, что и публиковаться он должен стремиться в таких журналах. В последнее время приобретает все большее значение публикации в журналах и конференциях, входящие в базы данных Scopus и Web of Science. Чтобы опубликоваться в изданиях, входящих в эти перечни, требуется и глубокое знакомство с публикациями, входящими в эти базы.

Глубина по журналам может быть рекомендована 5–10 лет. То же самое относится к патентам. Глубина поиска книг целесообразно увеличить до 8–12 лет, а в некоторых случаях теорий, которые могут быть названы «классическими», эта глубина может быть увеличена еще больше. Читатели обзора не будут судить о его новизне по датам опубликования книг, ссылки на книги подтверждают не новизну найденных решений, а их основательность, разработанность, в какой-то мере и актуальность. Естественно, что с момента разработки какого-нибудь нового метода до опубликования его в книге проходит от 2 до 5 лет, а для учебников этот срок еще может быть увеличен, тогда как в статьях новый метод может появиться в год разработки. Крайне неубедительным бывает утверждение соискателя об актуальности темы или о сложности реализации какого-либо метода, если оно подтверждено ссылками на публикации 20-летней давности и более старые. Ссылки на

такие старые публикации допустимы при обсуждении истории возникновения метода, при обсуждении авторства и т. п.

Достоверность источника. Для публикаций на научных сайтах главным вопросом является научная достоверность публикации, поскольку в ряде случаев процедура рецензирования может быть чрезвычайно упрощена, поэтому такие публикации могут носить порой антинаучный характер. Даже такой известный портал, как «Википедия» является свободно редактируемым и пополняемым ресурсом, доступным к редактированию любым пользователем. Информация из этого источника по своей научности сопоставима с опросом общественного мнения. Был случай, когда в этот портал попадали выдержки научно-фантастических романов с описанием технических средств, а оттуда – в рефераты студентов и аспирантов. Следует отметить, что в последнее время стали появляться и книги в твердых или мягких обложках, претендующие на статус «научное издание», но таковыми не являющиеся. Зачастую даже в публикации присутствует подзаголовок «Научное издание», но издание все же таковым не является. В научном издании должно быть указание на рецензентов, редакторов и, как правило, научный коллектив (институт, кафедру), рекомендовавший опубликование данного материала. К сожалению, даже необходимость таких атрибутов не всегда препятствуют попаданию в раздел научных изданий весьма сомнительных опусов. Действительно, вы можете издать «монографию» а коммерческом издании, и написать в качестве рецензентов хоть десять лауреатов Нобелевской премии. Издательство не потребует доказательств: за ваши деньги любой каприз. Имеются также случаи, когда авторы вполне научных трудов позволяют себе далеко не научные выводы и рассуждения во введении или в заключении. Так, например, в работе [3] автор позволил себе утверждать, что информация – это некоторая физическая субстанция, которая распространяется в пространстве со скоростью, в  $10^9$  раз превышающей скорость света. Это утверждение ни на чем не основано, ничем, разумеется, не подтверждено, и, конечно же, антинаучно, что не помешало получить этой книге статус учебника, рекомендованного УМО для вузов.

Оформление ссылки рекомендуется делать так, как этого требует ГОСТ Р 7.0.5–2008 [3]. Обращаем внимание, что ГОСТ 7.1-2003 [3] не имеет к этому никакого отношения, поскольку он регламентирует не библиографические ссылки в научной публикации, а библиографические карточки, используемые библиотекой в каталогах. В различных журналах могут действовать несколько различные требования к оформлению таких ссылок, в некоторых случаях требуется более

краткое оформление (как, например, в журнале «Приборы и техника экспериментов»), иногда (как, например, в информационных системах предприятия) требуется более детальная информация. В частности, при ссылке на патенты требуется не только указание номера патента, но и номера заявки и другой информации. В рабочих материалах, которые готовятся аспирантом и будут служить не только основой статьи – обзора, но и основой диссертации, поэтому желательно сохранять больше информации об источнике, в частности, для книг – указывать количество страниц, иллюстраций и библиографических ссылок, для патентов – номер и дату заявки, год, номер и страницы опубликования реферата в бюллетене и так далее. При оформлении ссылки непосредственно в тексте можно рекомендовать указание фамилии первого автора и года публикации, например: «Иванов, 2009». Если в используемом перечне несколько публикаций того же автора в тот же год, можно вводить последовательную нумерацию в порядке их следования, например, «Иванов, 2009-1» и «Иванов, 2009-2». Перечень используемой литературы в этом случае также целесообразно заполнять по алфавитному признаку, а не по порядку цитирования. При таком способе оформления ссылок изменение текста при редактировании, исключение, добавление или перемещение каких-нибудь новых фрагментов с собственными ссылками не вызовет никаких дополнительных трудностей, все связи сносок с публикациями останутся в силе.

Если диссертационный совет, в который готовится диссертация, или методический совет организации по месту выполнения работы, или, например, ведущей организации, настаивает на оформлении ссылок именно по требованиям ГОСТ 7.1-2003, то проще согласиться и сделать лишнюю работу, нежели переубеждать некоторых руководителей или целый коллектив.

Что надо сделать с найденными статьями? После того, как вам в руки попала статья, целесообразно оставить о ней такую запись, которая бы разъясняла вам, почему впоследствии у вас не возникнет необходимости поиска данной статьи, то есть сформировать заметку на тему «Почему эта статья мне не нужна». Это кажется абсурдным, тем не менее, это – наиболее эффективный метод работы с литературой. Действительно, если вы открыли статью и начали ее читать, то, следовательно, название этой статьи и место ее опубликование таково, что позволили вам предполагать возможность наличия в ней существенных для вас новых знаний, методов, методик или результатов в области ваших научных исследований и интересов. Если в данной статье, действительно, найдено что-то явно полезное для вас, сделайте выписку всего важного, и в дальнейшем вам статья целиком не понадобится. Чем более краткая выписка, тем

проще вам будет впоследствии ее учесть в обзоре, но помните, что если эта краткость достигнута в ущерб информативности, то вам придется заново отыскивать статью. Поэтому сокращать надо только то, что и без того понятно, либо достоверно не пригодится. Если же статья настолько лаконично написана и важна для вас, что сократить ее уже не представляется возможным, или сокращение видится вам более трудоемким, чем копирование, тогда, конечно, следует оставить копию статьи и отметить это в перечне. Предпочтите сканирование, а не ксерокопирование, разместите скан в папку и озаглавьте файл и папку так, чтобы скан легко было найти. При этом опасайтесь иметь более нескольких сотен статей – обилие копированных статей говорит не о вашей любознательности и не о вашем глубоком знании предмета, а, наоборот, о недостатке любознательности и одновременно о неумении отсеять лишнее. Мне доводилось видеть профессора, который копировал статьи пачками до 500 страниц и более, что называется «дорвался до ксерокса». Незачем всю литературу по интересующему вас вопросу пытаться превратить в архивные копии статей. Если вам в такой большой мере не хватает материала, имеет смысл озаботиться приобретением (временно или постоянно) книги по этому вопросу (причем, можно воспользоваться библиотекой). Даже для наиболее актуальной темы по-настоящему ценных статей в год выходит не так много, чтобы потребовалось единовременное копирование более полусотни статей (или по объему более 150 страниц), а если вы их и скопируете, то, вероятнее всего, не скоро соберетесь прочитать. Если же скопированные вами статьи вы начнете читать лишь через год, то эта информация будет уже частично не актуальной, поскольку за это время выйдут и новые статьи в этой области. Если исходить из того, что кандидатская диссертация пишется 2–3 года, и перечень из 200–300 наименований для диссертации будет вполне внушительным, можно признать, что 100 найденных публикаций по теме в течение года – это наиболее обоснованное количество, то есть в месяц вы можете находить приблизительно 8–10 публикаций по теме исследования. И это – много. Не следует предполагать, что в один прием вы найдете двести публикаций по теме, а далее целый год не будете возвращаться к этому вопросу. Такой подход неразумен и не научен. Интересоваться новой периодикой по теме исследования аспирант обязан ежемесячно. Если к вашему личному перечню публикаций по вашей теме каждый месяц будет добавляться 1–2 важные статьи (которые вы будете внимательно читать, копировать и складывать в специальную папку) и 6–8 статей близких к теме, но не настолько важных по содержанию и

достигнутым результатам, чтобы их следовало бы копировать, а достаточно было бы сделать лишь выписки, то можно оценить вашу работу с литературой наиболее высоко.

Пример такой выписки:

И.И. Иванов, П.П. Петров. Принципы аналитического синтеза регуляторов в условиях неопределенности коэффициентов модели объекта. М. 2010. Литхудиздат. 222 с. В книге рассматриваются аналитические методы проектирования регуляторов для линейных объектов. Особенность состоит в учете возможных изменений коэффициента передачи объекта. Предлагается метод пробной девиации коэффициента усиления в системе. Для моего исследования предлагаемые методы неприменимы, поскольку в них используется априорные знания о постоянных времени объекта, которые предполагаются неизменными; кроме того, в объектах не присутствуют запаздывание и нелинейность. Тема моего исследования касается нелинейных объектов с запаздыванием, для которых описанные методы неприменимы.

В данном случае понятно, почему источник попал в поле вашего зрения: название родственно теме вашего исследования. И понятно, почему данная книга не нужна вам для постоянной работы – методы не могут быть применены. Для библиографического обзора во введении диссертационного исследования такая книга будет полезна, при этом в тексте введения вы сможете написать эту суть. Наличие этой публикации подтверждает актуальность вашего исследования, наличие ссылки на эту публикацию подтверждает то, что вы владеете тематикой и знаете литературу по теме исследований, а ваш комментарий о невозможности использования опубликованных результатов будет подтверждать сложность решаемой задачи. Напомню, что «диссертательность» складывается из актуальности, сложности, научности методов, научной новизны и практической полезности полученных результатов.

Тематика поиска при составлении научного обзора. Соискатель должен составлять научный обзор, как минимум, в двух направлениях:

1. Решаемые задачи.
2. Методы решения задач.

Скажем, если тема исследования связана с адаптивным управлением теплоэнергетическими агрегатами, то необходимо отыскание литературы и по этим агрегатам, которая бы доказывала актуальность темы исследований, и более глубокий поиск по методам адаптивного управления. Разумеется, если вы найдете литературу, которая бы одновременно отвечала и предмету исследования и методу решения этой задачи, то есть литературу по адаптивному управлению теплоэнергетическими агрегатами, то эта литература будет чрезвычайно полезна для

диссертации даже в том случае, если она не характеризуется достаточной новизной (по дате опубликования). Если же она и достаточно нова, и к тому же все предполагаемые к решению задачи в ней освещены достаточно полно, то эта литература для вас бесценна. Но возникает вопрос о целесообразности диссертационного исследования, коль скоро этот вопрос уже достаточно полно решен и описан в указанной литературе. Как правило, все же, если тема исследования сформулирована и поставлена грамотно (это лежит на совести вашего научного руководителя), то готового решения для всего круга задач вы не найдете, но все равно поиск литературы следует проводить так, как будто бы вы уверены в том, что эти решения есть, и как будто бы ваша основная цель в данном случае именно найти эти решения, а не доказать себе и другим, что таких решений нет и найти их невозможно.

Грамотно выполненный литературный поиск может в итоге доказать отсутствие готовых решений и (или) недостаточность известных методов и методик, что обоснует актуальность ваших исследований. Но если поиск осуществляется с целью это доказать, то можно с уверенностью утверждать, что такой поиск будет не просто безрезультатен, но и его результаты будут недостоверны. Ибо никто еще не опроверг утверждение, что «Желание – это тысячи возможностей, а нежелание – это тысячи отговорок». Поэтому поиск должен быть проведен с целью отыскания хотя бы некоторого количества такой литературы, которая может быть весьма успешно использована для решения поставленной задачи.

Место научной школы вашего руководителя. Одинаково неприлично будет выглядеть обзор, в котором преобладают публикации вашего научного руководителя (или научной школы, к которой принадлежит этот руководитель) и обзор, в котором таковые публикации отсутствуют. В первом случае будет понятно, что вы ограничили поиск теми статьями, которыми поделился с вами научный руководитель. Во втором случае будет ясно, что вы даже статьи вашего руководителя и научной школы, в которую пытаетесь войти, не знаете достаточно глубоко, или же данная школа не обладает достаточной компетенцией (как минимум, по вашему мнению) в данном вопросе, и вам нечего привести в вашем обзоре из того, что опубликовано данной школой по решаемой вами задаче. И в том и в другом случае читатель усомнится в ценности вашего научного исследования. В первом случае возникнет недоверие к вам как к специалисту, во втором – недоверие к вашему научному руководителю (не имеющему соответствующих статей) или опять-таки к вам, который не смог по достоинству оценить результатов вашего руководителя (в предположении, что такие статьи все же имеются, но вами не отмечены).

Мне представляется, что публикации научной школы, к которой принадлежит ваш научный руководитель, ни в коем случае не должны превышать 10-20% от всех публикаций, на которые идут ссылки в вашем обзоре. Естественно, что в обзоре ссылок должно быть не менее двух-трех десятков. Серьезные литературные обзоры (то есть обзоры по классическим направлениям в высокорейтинговых журналах), как правило, содержат порой до полутора сотен ссылок и более.

Острый вопрос о ссылках на конкурентные статьи. Если вами найдены статьи, в которых достижения в области ваших исследований соизмеримы или даже превосходят ваши достижения, остро становится вопрос о том, как правильно на них сослаться, и надо ли на них ссылаться. Следует признать, что сделать вид, что этих статей не существует – это плохое решение не только с этической точки зрения, но и с позиции рациональности. Этическая сторона очевидна. Нерациональность умалчивания состоит в том, что в отзывах на диссертацию или в выступлениях членов диссертационного совета (или любых гостей) информация о наличии таких статей может проявиться. Если такое возможно, следует предполагать, что это случится. Отсутствие ссылок в обзоре свидетельствует о слабой осведомленности соискателя о достижениях в области исследований, следовательно, ставит под сомнение ценность всей диссертационной работы. Напротив, следует тщательно изучить указанную конкурентную работу. Могут быть найден один из следующих факторов:

1. Данная статья опубликована позже вашей публикации (или хотя бы времени завершения вашего исследования). В этом случае она не умаляет новизны и ценности вашего исследования.
2. Метод или результаты в этой статье все же отличаются от вашего метода или результатов.
3. Ваш метод проще, даже если не позволяет достигать результатов указанной статьи.
4. Сфера применения вашего метода шире, и так далее.

В любом случае лучше упомянуть конкурентные публикации и объяснить, почему их наличие не снижает актуальности, ценности и научной новизны диссертации, нежели пытаться неубедительно импровизировать на эту тему на защите, поскольку любое объяснение не отвечает на вопрос: «Почему вы не сослались на эту статью в обзоре?». Автор может не знать каких-то экзотических публикаций в низкорейтинговых сборниках других стран и городов, но он не имеет права не знать публикаций на тему исследований в тех журналах, в которых публикует свои собственные результаты.

### 1.3. Пример направления поиска при составлении обзора

Поиск по методам адаптивного управления может быть проведен по следующим направлениям:

1. Методы самонастройки, то есть первоначальной настройки до момента ответственного функционирования системы.
2. Адаптивные методы, то есть методы изменения настройки в ходе ответственного функционирования.
3. Другое.

При любой классификации можно предполагать «другое», поскольку если вы сами формируете некоторые классы, вы можете чего-то первоначально и не учесть. Под «самонастройкой» в данном случае следует понимать такую настройку, которую мог бы осуществить оператор до того, как регулятор и система будут переданы в эксплуатацию. То есть при этом допустимо многократное включение и выключение системы, другие действия, которые допускаются при создании системы, но категорически не допускаются при ее функционировании. Например, может быть достигнута очень большая ошибка управления, которая в реальном режиме трактовалась бы как аварийный режим, или привела бы к большому количеству бракованной продукции или иным неприятностям. Когда система еще только разрабатывается, к ней не предъявляются требования по качеству работы. «Настройка» - это часть разработки. Поэтому «самонастройка» - это тоже часть разработки системы, только выполняется она не в ручном режиме, а автоматически.

Под адаптивной работой предполагается в общем случае нечто иное. Адаптивная система должна менять свои свойства в ходе функционирования, при этом эти изменения ни на каком этапе не должны приводить к некачественной работе системы. В противном случае это нельзя назвать адаптацией.

Например, когда вы передали автомобиль в службу автосервиса, пока он находится там, вы не выставляете требований безопасности его работы для пассажира. В момент настройки систем автомобиля он не находится на дороге, и в нем нет пассажиров. После передачи автомобиля в эксплуатацию, если в нем находятся адаптивные системы, то их работа даже на время не должна приводить к тому, что работа систем отклоняется от требуемого режима. Если автомобиль на некоторое время станет неуправляемым, то вас слабо утешит тот факт, что впоследствии он снова станет управляемым. Вам требуется постоянное высокое качество управления вашим автомобилем, поскольку ценой за его отсутствие может стать ваша безопасность.

Могут существовать и алгоритмы, которые трудно четко отнести к тому или иному классу.

Но любая классификация должна быть такова, чтобы каждый классифицируемый объект относился только к одному классу и ни один из них не относился бы одновременно к нескольким классам, поэтому при наличии таких синтетических алгоритмов следует предусмотреть дополнительный класс, например, «синтетические методы», которые обладают признаками и тех и других систем.

Далее, например, адаптивные системы можно различать по следующим подклассам:

1. Системы, требующие первоначальной настройки.
  2. Системы, не требующие первоначальной настройки.
- Также можно адаптивные системы (и самонастраивающиеся) разделять по количеству настраиваемых параметров регулятора:
1. Один параметр (например, общий коэффициент).
  2. Два параметра (например, общий коэффициент и дополнительный коэффициент интегратора).
  3. Три параметра (например, все три коэффициента ПИД-регулятора)
  4. Более трех параметров.

Также адаптивные и самонастраивающиеся системы можно классифицировать по видам объектов, с которыми указанные системы работоспособны, по методу принятия решений (на изменения параметров), по виду изменений в моделях объекта и по количеству изменяемых параметров этой модели и так далее. Например, в объекте может меняться только коэффициент усиления, или только одна из постоянных времени, или только запаздывание, а может меняться несколько параметров. В наихудшем случае в модели объекта может меняться даже аналитический вид этой модели или, например, может быть неизвестным порядок этой модели.

Некоторые методы могут быть весьма эффективными и успешными для одного класса задач, и совершенно непригодными для другого класса задач. Характерная ошибка аспирантов при составлении обзора методов состоит в том, что какой-то эффективный для одного класса объектов метод называется «наиболее эффективным» без этой оговорки, причем может оказаться, что для решаемых аспирантом задач данный метод не только не эффективен, но и вовсе не пригоден.

При написании обзора также важно попытаться формально осуществить постановку задачи. В частности, при решении задачи управления объектом или его стабилизации самоочевидна цель сведения ошибки управления к минимуму. Однако, в одних случаях необходимо обеспечение высокого быстродействия, в других более важным является достижение нулевой статической ошибки, в ряде задач небольшое перерегулирование допускается, в других же задачах оно категорически не допускается, и так

далее. Поэтому эффективный для одних задач метод может оказаться непригодным для других задач.

#### 1.4. Анализ объекта исследования

Анализ объекта исследования традиционно ведется тремя методами:

1. Деление – это разделение объекта на элементы для описания объекта как системы элементов (и по этим элементам более полного понимания функционирования объекта).

2. Системный анализ – это рассмотрение объекта как элемента системы и понимание его функций с этой позиции.

3. Синтез двух этих подходов (который также иногда называют «системным подходом») – соединение этих двух подходов воедино.

Например, в первом случае объект «Робот-снегоуборщик» нас интересовал бы как устройство, состоящее из корпуса, двигателя, движителя, системы управления и так далее. Можно было бы рассматривать внутреннюю структуру этого объекта, как его отдельные элементы взаимосвязаны и как они совместно функционируют.

При втором подходе этот робот нас интересовал бы лишь как механизм, действующий на улице в обстановке наличия снега, который требуется убрать. Нас интересовали бы выполняемые роботом функции, а процессы, происходящие в нем самом, нас бы при этом уже не интересовали.

В третьем случае мы бы рассматривали и робот, как систему из отдельных элементов и узлов, и робот как элемент в системе улицы, заполненной снегом, и из второго рассмотрения выводили бы состав потребляемой им энергии, динамическую и статическую точность управления и так далее, а из второго рассмотрения – функционирование робота как элемента системы в целом, его взаимодействия с ней, воздействие ее на него.

Такой полный подход по схеме №1, №2, №3 целесообразен при рассмотрении любых объектов автоматического управления и систем на их основе.

#### 1.5. Подготовка патентной информации

Ваши результаты исследований могут быть основой для получения патента. Если вы работаете над диссертацией по техническим наукам, то ваш основной результат, естественно, является некоторым техническим достижением. Наиболее простой путь доказать его полезность и новизну, а также защитить ваши авторские права является оформление патента на изобретение или на полезную модель.

Изобретением может быть структура предлагаемого устройства или метод решения той или иной задачи. Полезная модель оформляется только по отношению к структуре

устройства, на способ (метод) полезная модель не оформляется.

Можно в ближайшее время ожидать падение значимости зарегистрированных программных продуктов и не исключено, что со временем перестанут принимать в расчет патенты на полезные модели. Поэтому патенты на изобретения предпочтительны, но если вы спешите, учтите, что патенты на полезную модель оформляются быстрее.

Экспертиза на изобретение более длительная, к такой экспертизе привлекаются внешние эксперты. Экспертиза на полезную модель осуществляется самим автором. Поэтому процедура оформления патента на полезную модель более проста, но и документ, защищающий ваши права (Патент на полезную модель) имеет менее длительный срок действия, чем документ, защищающий права на изобретение (Патент на изобретение). Если выяснится, что имеется известный более ранний аналог устройства, которое было защищено патентом на полезную модель, то этот патент будет аннулирован. Поэтому автор должен тщательно и со всей ответственностью осуществлять авторскую экспертизу заявки на полезную модель.

Для определения новизны вашего изобретения или вашей полезной модели требуется осуществить патентный поиск. Для этого следует воспользоваться классификатором МКИ. Существует несколько версий этого классификатора, которые выходили в разные годы. Соответственно, поиск целесообразно проводить по индексам разных классификаторов.

В этом виде классификатора за основу классификации берутся полезные свойства устройства, а не его структура. Ранее заявка на патент могла быть отклонена по причине идентичности структурной схемы устройства, которое предназначено совершенно для других функций – только на основании сходства признаков структурной схемы. В последнее время такая практика отменена, поиск аналогов осуществляется только внутри классов данного изделия, например, заявка на частотный детектор не может быть отклонена по причине сходства структурной схемы с известным устройством, например, для измерения температуры.

Заявка на патент должна содержать несколько важных пунктов. В этой заявке следует указывать назначение устройства, не менее двух аналогов, то есть устройств, выполняющих аналогичные функции, но имеющих другую структуру, а также один прототип. Прототипом называется наиболее близкое по структуре и по назначению устройство к структуре заявляемого устройства. В описании также должно содержаться описание принципа действия, то есть описание работы устройства, за счет чего оно выполняет те функции, для которых оно

предназначено. Возможно включение рисунков аналогов и прототипа, но не желательно. Экспертиза проходит проще, если присутствуют только рисунки, относящиеся к заявляемому устройству (они называются фигуры). Прототип и аналоги описываются простым перечислением их компонент и связей между ними так, что если все названное изобразить, получится требуемый рисунок. Поэтому при подготовке заявки имейте перед глазами рисунки аналогов и прототипа. Используйте ту же терминологию, что и в прототипе, не используйте синонимы. Каждый элемент называйте так, как назвали его в первый раз. И не применяйте одинаковую нумерацию для различных элементов. Одинаковые элементы в прототипе и в вашей заявке называйте одинаково. Отличительные особенности заявляемого устройства от прототипа записываются в формуле изобретения.

Формула изобретения – это такое описание устройства, в котором отделяются ранее известные составные части изобретения от новых составных частей и связей. Между этими частями имеется фраза «отличающееся тем, что...». Например, «Блок измерения частот, содержащий ... (далее описываются все элементы этого блока, которые имеются в прототипе), причем (далее описываются все имеющиеся в прототипе соединения), ... отличающийся тем, что в устройство введены (далее перечисляются элементы, которых нет в прототипе), причем ... (далее перечисляются соединения, которых нет в прототипе)». Должна быть поставлена какая-то позитивная цель изобретения, и следует в описании показать, что измененная структура обеспечила достижение этой цели.

Если автор хочет одним патентом защитить несколько версий устройства, то применяется многозвенная формула изобретения. В этом случае в первой формуле описывается простейший или предпочтительный вариант структуры устройства. В дополнительных формулах описываются отличия этих формул, например, «Устройство по п.1, отличающееся тем, что амплитудный детектор заменен на детектор мощности входного сигнала».

Формула описания должна быть такой, что если читатель нарисует все элементы и все соединения, перечисленные в ней, получится именно та структурная схема, которая защищается данным патентом (и которая прилагается на фигуру к патенту).

## **2. ПОДГОТОВКА ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ НАУЧНОЙ СТЕПЕНИ**

### **2.1 Необходимость соблюдения формы документов (диссертации и автореферата)**

Высшая аттестационная комиссия выработала правила оформления диссертаций и

авторефератов. Нельзя их нарушать. Если вам кажется, что они не удачны, лучше пойдите по одному из следующих путей: или не защищайте диссертацию вовсе, или защитите ее, а потом направьте в ВАК предложения по изменению этих правил.

Это – как игра в шахматы. Если вы не согласны, что конь ходит буквой «Г» или считаете, что пешка должна рубить не только наискосок, но и вперед и назад, то собирайте единомышленников и играйте с ними в вашу новую игру, но на шахматный турнир вас с такими убеждениями не пустят. Тем более было бы неуместным предлагать изменить правила игры во время игры! А ведь не соблюдение требований ВАК, хотя бы даже в мелочах, несоблюдение хотя бы требований к наличию обязательных пунктов автореферата, это то же самое, что предложение изменить правила игры в ходе самой игры.

Поэтому внимательно прочитайте перечень всех пунктов, и поймите, в чем разница. Если даже вам кажется, что «Научная новизна» и «Полученные результаты» это – одно и то же, то поверьте, вам так только кажется. Если вы считаете, что пункт «Защищаемые положения» не обязателен, или он может быть заменен пунктом «Основные результаты» или пунктом «Научная новизна», то это тоже только ваше мнение, и мнение ошибочное.

Пункт «Защищаемые положения» может быть озаглавлен кроме этого варианта еще так: «На защиту выносятся: ...» или «Положения, выносимые на защиту». Но суть остается. Защита состоит в том, что выдвигаются и защищаются в дискуссии новые научные положения, сформулированные кратко, но полно и конкретно.

Неумение сформулировать полученные новые научные результаты в форме защищаемых положений говорит о том, что человек пока еще не отвечает всем требованиям, предъявляемым к носителю искомой научной степени.

Если же человек сформулировать положения умеет, но полученный научный материал не дает оснований для таких формулировок, то не созрела пока что его работа.

Все предельно просто. Поскольку этот пункт самый важный, начните написание диссертации с формулировки этого пункта, то есть с защищаемых положений. И по ходу работы над диссертацией эти положения будут все более уточняться, так, что в итоге они выкристаллизуются в такую форму, которая будет наиболее точно описывать суть ваших достижений.

Защищаемые положения должны опираться на опубликованные вами (возможно, в соавторстве) научные статьи. Если по требованиям ВАК установлен минимум в размере трех статей из перечня ВАК, то добейтесь того, чтобы в перечне вашей публикации было не менее четырех статей. Для

вашего спокойствия минимум необходимо превзойти. Крайне желателен хотя бы один патент или зарегистрированный программный продукт при защите диссертации по техническим наукам. Крайне желательно внедрение, а лучше несколько внедрений результатов в промышленность, в бизнес, в учебный процесс и так далее. Крайне желательно наличие сольных публикаций без соавторов. Если вы участвуете в молодежной конференции, лучше не включать в соавторов научного руководителя. Для того чтобы не ущемить его прав, опишите в таком докладе и статье только то, что сделали лично вы, сами, а руководителю в конце статьи выразите признательность, сослнитесь на его публикации. Это повысит индекс цитирования вашего руководителя, будет вполне достаточной формой выражения ему признательности и признания его заслуги.

Если в момент, когда вы решили окончательно оформить диссертацию, какие-то из ваших статей еще не вышли из печати, принимайте окончательное решение, как поступить: либо дожидаться выхода этих статей, либо исключить их из перечня публикаций по теме диссертации окончательно и бесповоротно. Большое желание включить новые статьи после их выхода в перечень публикаций извинительно, но следует сдерживать себя, чтобы не попасть в ловушку. Действительно, если в разосланных авторефератах и в диссертации, с одной стороны, а в докладе и презентации, с другой стороны, указано разное количество публикаций или просто их перечень не совпадает, это говорит о том, что автореферат и диссертация не полно представляют результаты работы. Если без данной публикации автореферат был разослан, диссертация была выставлена на сайте, следовательно, вы утверждали, что перечень приведенных вами публикация достаточно полно раскрывает содержание диссертации и защищаемых положений. То есть других статей не требуется. Если же вы впоследствии вставляете в этот перечень еще одну статью, то вы утверждаете, что она по теме диссертации, и, следовательно, вы противоречите сами себе, ибо опровергаете ранее выдвинутый тезис, что другой более короткий перечень достаточен.

Также не следует вставлять в диссертацию иллюстрации, графики, таблицы, которые еще нигде вами не опубликованы. Это позволяет обвинить вас в нарушении требования того, что все представленные в диссертации результаты опубликованы. Если данные результаты необходимы для доказательства защищаемых положений – дожидитесь выхода публикации, если же без них можно доказать защищаемые положения, не включайте их в диссертацию. Можно перечислить статьи «не по теме диссертации», к этому перечню таких жестких

требований не предъявляется, это могут быть статьи по любой научной специальности и тематике. Их наличие не обязательно.

Статью, которая вышла, пока диссертация вылеживалась в диссертационном совете, можно упомянуть в ответе на вопрос о дальнейших исследованиях после защиты и о перспективе этих научных исследований в будущем.

### 2.1. Последовательность в изложении

Если вы говорите об актуальности, не надо перескакивать на результаты, если говорите о научной новизне, не надо углубляться в доказательства достоверности. Все эти разделы должны идти в строго определенной логической последовательности, заданной формой автореферата.

Сначала идет речь об актуальности целей (то есть того, что может быть несколько шире результатов конкретно этой диссертации), затем – о вытекающих из этой цели задачах (то есть о том, что конкретно решено в диссертации и будет изложено в докладе). Далее говорится о полученных результатах в этой области со ссылками на авторов, подчеркивается, что еще не получено, какие трудности в получении этого. После этого формулируются цели и задачи исследования. Далее идут методы исследования и так далее по пунктам. Лучше если в общем разделе будут изложены сначала теоретические посылки, обоснования, выводы, методики и так далее; затем – практические результаты и иллюстрации, и в конце доклада автор логически подведет слушателей к защищаемым положениям как к выводам из доклада.

Нелогично, когда в диссертации и даже в автореферате доказываются некоторые теоремы, а среди защищаемых положений нет пункта «теоретически обосновано...» или что-то в этом духе.

Если в автореферате приведена теорема, то, как минимум, там же надо сказать хотя бы каким способом она доказывалась, например, теорема доказана методом «от противного» или подстановкой какого-то соотношения с дальнейшим учетом каких-то ограничений и т. п. Не обязательно приводить в автореферате само доказательство, оно должно быть в диссертации, и этого достаточно. Но сказать, каким методом доказательство осуществлено, необходимо. Если у теоремы или леммы имеются следствия, то после их формулировки необходимо указать, что дают эти следствия, например, «это позволяет сформировать рекуррентную процедуру» и т. п.

Если в защищаемых положениях сказано «на защиту выносятся соотношение...» то это соотношение, естественно, должно быть в автореферате, но этого мало. Оно должно иметь номер и в тексте должно быть сказано, что именно это соотношение выносятся на защиту,

и в чем, собственно, состоит его новизна и практическая полезность. Если таких фраз в защищаемых положениях, допустим, четыре, то и в автореферате должно быть таких соотношений тоже четыре, и должна быть полная ясность, какое из них какому положению соответствует.

Если приведено какое-то известное (то есть выведенное не вами) уравнение или соотношение, то это должно быть сделано для чего-то, и должно быть понятно, для чего. То есть с ним надо дальше работать. В автореферате, как минимум, должно быть сказано, например, «в таких-то условиях это уравнение переходит в соотношение вида...» с которым далее осуществляется работа.

Привести уравнение просто так, и не работать далее с ним – столь же нелогично, как, например, говоря о пустыне сказать: «А вот еще бывают такие айсберги – большие и белые». К чему, зачем данное упоминание? – это должно быть понятно, либо это упоминание надо убрать. Если уж так хочется упомянуть айсберги при разговоре о пустыне, ну, хотя бы скажите что-то вроде: «Природа неравномерно распределила запасы пресной воды по поверхности земли: где-то плавают огромные айсберги, а где-то, как в случае нашей пустыни, сто граммов воды на квадратный метр выпадает раз в пять лет». Изложение должно быть логичным и последовательным!

Не используйте разговорный стиль в печатных трудах и не используйте печатный стиль в устной докладе.

Устно не следует использовать сложных предложений, длинных причастных и деепричастных оборотов, нарочито усложненных терминов. В жизни так не говорят, и вы так не говорите. Тогда вашу устную речь проще будет выучить наизусть, и она будет звучать естественно, словно вы просто сами что-то рассказываете. Учить же речь наизусть необходимо, иначе непременно собьётеся. Тщательно хронометрируйте свою речь. Для кандидатской диссертации предоставляется 20 минут, следовательно, 21 минута – это уже перебор, 22 и более минуты просто недопустимо. Небольшая экономия времени допустима, но не слишком большая, то есть 19 минут желательно, 18 минут уже плохо, 17 минут и менее – крайне плохо. Весь предоставленный ресурс времени желательно использовать, перебор недопустим. Вот почему важно хронометрировать и тренироваться. Разбейте доклад на куски, и определите продолжительность каждого куска. Изложение собственных результатов, подтверждение их достоверности и важности – это самое главное, это должно занимать не менее половины времени, то есть десять минут. Следовательно, краткие выводы должны занимать не более минуты, актуальность – около четырех минут, известные достижения других коллективов и

ваших предшественников в вашем коллективе – не более пяти минут.

Нет необходимости зачитывать публикации и говорить о том, что они сделаны в соавторстве – это очевидно из демонстрируемого вами в конце доклада списка публикаций. Достаточно сказать, сколько их всего, сколько из них входят в перечень ВАК. Количество сольных публикаций люди увидят из списка, либо это вы сможете сказать при ответе на вопрос, если кого-то это заинтересует.

### **2.3. Недопустимость путаницы в терминологии**

Если вы называете задачу «некорректной», то и решения ее предлагать вы, видимо, не должны. Ибо известно, что некорректно поставленной задачей называется задача, решение которой невозможно без привлечения дополнительной информации. Если же решение возможно, то это уже не некорректная задача. Задача при недостаточной информации может быть вполне корректна, некорректность обычно определяется другими условиями.

Скажем, если результатом деления «на ноль» является «бесконечность», то делимое найти невозможно. То есть отыскание делимого в этом случае – некорректно поставленная задача. Если же результатом деления на «бесконечно малую величину» является «бесконечно большая величина», то, возможно, имеется в виду «практическая бесконечность», то есть такая величина, которая на практике в некоторых специфических задачах принимается за бесконечно большую, но на самом деле она вполне конечная и определенная. То есть, например,  $1 \cdot 10^{-16}$  считается бесконечно малой (в сравнении с единицей) величиной, а  $1 \cdot 10^{+16}$ , соответственно, бесконечно большой. Но при этом эти величины вполне конкретны. Разумеется, в этом случае отыскание делимого является корректно поставленной задачей.

Пример некорректной задачи: отыскание траектории пушечного ядра через десять секунд после того, как из него вылетела пуля, на основании баллистических данных о полете пули.

Пример корректной задачи: отыскание на основании этих же данных положения пушечного ядра в момент выстрела или даже в первое мгновение после выстрела.

Таким образом, задача, объявленная некорректной, либо не должна решаться, либо должна предварительно трансформироваться в корректную на основании привлечения дополнительных данных. Но тогда не ясен смысл объявления ее некорректной, ведь если дополнительные данные доступны, то кто мешал их применить?

Такая же путаница порой бывает с понятиями «погрешность» и «ошибка» – это разные понятия из разных прикладных наук (первая из метрологии, вторая из теории автоматического управления). Путаница часто возникает с

понятиями «неполная информация», «измерение с ошибкой» и так далее. Порой возникают неожиданные термины «точная информация» или «измерение без ошибки», что надо отнести либо к области фантастики, либо к идеальной модели.

Если обсуждается, например, «эксперимент в условиях шума» или «измерения с погрешностью», то хорошим тоном будет указать, известна ли статистика шума (погрешности), или хотя бы оценка величины того или иного мешающего фактора. Ведь совершенно не одно и то же – измерения низкочастотного сигнала в условиях небольшого высокочастотного шума, или, скажем, измерения широкополосного сигнала при наличии широкополосной же помехи, которая соизмерима по величине с сигналом!

Кстати, о «широкополосной», «узкополосной» и иных помехах речь тоже порой ведется крайне путано. Более корректно говорить о соотношении полосы шума с полосой сигнала. Если сигнал низкочастотный, то что такое, вообще говоря, «широкополосная помеха»? Помеху можно разделить на ту часть, которая попадает в спектр сигнала (и с ней как-то надо бороться специфическими методами) и ту, которая лежит вне полосы сигнала (и от нее попросту надо избавиться с помощью обыкновенного фильтра). Сравнить по энергиям сигнал и «широкополосную помеху» в таком случае некорректно – следует сравнивать энергию или амплитуду сигнала с энергией или амплитудой той части сигнала, которая лишь попадает в полосу сигнала и не может быть устранена фильтрацией.

Также зачастую встает вопрос о виде распределения случайной величины. Каким образом автор доказал, что оно нормальное? Следует учесть, что доказать это зачастую просто невозможно, а зачастую даже можно опровергнуть, что обсуждаемое распределение нормальное. Нормальное распределение – самое сложное, наименее прогнозируемое. Даже для нормального распределения могут быть применены статистические характеристики: математическое ожидание, дисперсия, корреляция и так далее. Эти характеристики достаточно хорошо работают даже для нормального распределения. Для любого другого распределения эти характеристики работают еще лучше, поэтому если вы используете гипотезу нормального распределения, но она не доказана, то все же ваша гипотеза оправдана тем, что вы предполагаете наилучший случай, следовательно, не ошибетесь.

Все это – азбука, но почему-то порой это опускается из виду.

#### 2.4. О нежелательности использования характеристик, которые не могут быть выражены численными значениями

Интересно отметить, как зачастую возникает и применяется термин «точность».

Если точностью вы называете «погрешность», то вы не правы. Действительно, нелепо звучит, например: «Мы достигли точности 0,01%, а потом еще увеличили точность». Но не менее нелепо звучит эта фраза и разорванная пополам и разнесенная в разные куски работы. То есть если в одном месте вы пишете «Точность наших измерений составляет 0,01%», а в другом месте, даже на другой странице вы пишете «Это позволило еще больше увеличить точность измерений», то мы должны взять величину, которая больше, чем 0,01%, то есть, например, 0,1%. Но ведь эта «точность» хуже! Поэтому точностью надо называть, как минимум, величину, обратную относительной погрешности. То есть если вы достигли погрешности 0,01%, то надо называть точностью величину 10 000. Тогда мы можете «увеличить» эту точность, например, в два раза, что даст новую величину 20 000, то есть погрешность уменьшится вдвое до величины 0,005%. И это будет почти корректно. Почему «почти»? Покажем на примере.

Допустим, мы ввели «точность», как обратную величину погрешности. Пусть у нас, например, погрешность составляет  $\delta = 3 \cdot 10^{-10}$ . Тогда мы можем сказать: «Погрешность составляет три единицы десятого знака». Иногда ученые позволяют себе сказать: «Погрешность понижена до нескольких единиц десятого знака», или еще короче «Погрешность понижена до единиц десятого знака».

Перейдем к понятию «точность»  $A = 1/\delta$ . Получим величину обратную, которая равна:  $A = 1/(3 \cdot 10^{-10}) = 1/3 \cdot 10^{10} = 0,333333 \cdot 10^{10} = 3 \cdot 10^9$

То есть, надо сказать «Точность составляет несколько единиц девятого знака». Если же вы, глядя на величину погрешности, понимая, что она равна нескольким единицам десятого знака, скажете, что точность соответствует нескольким единицам десятого знака, вы обманете своих слушателей ровно на порядок, преувеличите свои заслуги в десять раз. Видите, как важно договориться о терминологии?

Поэтому необходимо выполнять правило: Никогда не говорите о точности, как о физической величине, которую можно охарактеризовать каким-то числом или сравнить соотношениями «больше» или «меньше». Всегда оперируйте понятием «погрешность», и различайте при этом абсолютную и относительную погрешность.

#### 2.5. Необходимость обоснованности применения термина «Оптимальность»

Очень хочется порой блеснуть терминами «оптимальное решение», «оптимальные

результаты». В математических и технических науках слово «оптимальный» означает «полученный в результате решения задачи оптимизации», а решение этой задачи предполагает отыскание экстремума некоторого функционала в зависимости от подынтегральных функций (или хотя бы коэффициентов).

Не всегда существует оптимальное решение, даже если существует вполне приемлемое.

Даже в быту оптимальность означает некоторый компромисс, например, между качеством и стоимостью товара, между сроком, стоимостью и качеством разработки и так далее.

Применение такого термина ко многому обязывает: необходимо его обосновать. Если вы сказали «получено оптимальное решение», ожидайте вопроса: «Какой именно функционал вы оптимизировали, и экстремум целевой функции вы при этом отыскивали?»

Но зато уж если у вас в работе встречается решение задачи оптимизации, то ее результаты должны попасть в защищаемые положения именно в такой формулировке, не надо ослаблять ее, например, формулировкой «найден приемлемое решение», или просто «решена задача» – это менее сильно, чем «оптимизировано решение» или тем более – «разработан алгоритм (методика, процедура) оптимизации решения». Сильный тезис в автореферате требует сильной формулировки в защищаемых положениях, отсутствие такого тезиса делает сильную формулировку необоснованной. Следите за соответствием того, что излагается тому, что звучит как итог, «сухой остаток».

## 2.6. Избегайте слабого звена

Избегайте выдвижения сомнительных тезисов. Особенно это относится к защищаемым положениям. На ставьте диссертационный совет перед необходимостью выбора: либо отказать вам в присуждении искомой научной степени, либо согласиться с сомнительным (или даже откровенно ошибочным) утверждением, даже при том, что оно единственное ошибочное в ряде многих обоснованных и доказанных.

Прочность цепи определяется прочностью самого слабого её звена. Слабое звено порвется, крепость остальных звеньев ситуацию никак не исправит. Надежность обшивки корабля определяется надежностью самого слабого места этой обшивки. Что толку вам в крепкой обшивке в других местах, если она будет пробита в самом слабом месте? Корабль это не спасет.

Поэтому если вы сильны в моделировании и экспериментальных исследованиях, но велик для вас соблазн включить в диссертацию новое теоретическое положение, либо убедитесь в его ценности, обоснованности, научной новизне, в том, что именно вы первые его выдвинули, либо при сомнениях в этом не включайте столь

сомнительный результат в перечень ваших научных достижений, а сосредоточьтесь на том, что действительно ценно и в чем вы наилучший специалист.

## 2.7. О сильных и слабых словах и словосочетаниях

Нет никакой необходимости говорить «была проделана работа», когда можно сказать «выполнено исследование». Слово «была», «был» вообще не нужно. Оно просто отсылает в прошлое, указывает, что какое-то действие в прошлом делалось. Без этого слова глагол принимает форму совершенного действия: работа не «делалась», а «сделана», действия (исследования) не «были», а «выполнены» полностью.

Исследование не проводилось, а «выполнено» или «завершено».

Решение не «найден», а «предложено». Находят то, что уже существует, а предлагают то, чего еще нет.

Структура не «выбрана», а «разработана». Выбирают товары в магазине – из имеющегося ассортимента, а разрабатывают то, чего еще нет.

Не может быть целью или задачей «изучение», поскольку изучение – это приобретение знаний именно тем, кто изучает, что не исключает, что в целом эти знания уже имеются и доступны ученым. Вы можете изучать известные методы, или факты, или полученные не вами таблицы. Исследование – это получение новых сведений, которыми никто не обладает, не только вы, но и научный мир в целом.

Применяйте «разработан» вместо «разрабатывалась», «внедрен» вместо «внедрялась», «исследован» вместо «исследовалась» и так далее.

## 2.8. Соответствие паспорту специальности

Вами выбрана научная специальность. В паспорте специальности указано, какие достижения и в какой области относятся в этой специальности. Все или подавляющая часть защищаемых положений должны соответствовать этой специальности. Не следует полагаться на интуицию. Если вам кажется, что достижения относятся к этой специальности, все же убедитесь, что это именно так и изучите паспорта похожих или близких специальностей. Соискатель вправе выбирать тот диссертационный совет, который отнесется к нему с наибольшей благожелательностью, но специальность следует выбирать по формальным признакам, по соответствию достижений соискателя паспорту специальности.

## 2.9. Необходимость сочетания краткости и убедительности

Краткость особенно полезна в рутинной части процедуры защиты, а именно при ответе на

вопросы.

Помните, что тезис «да, я согласен» не требует дальнейшего разъяснения. Вместе с тем, как часто приходится выслушивать после этого тезиса не нужную информацию о том, как произошла та или иная ошибка. История опечаток и ошибок не входит в задачу защиты диссертации. Членов диссертационного совета раздражает, когда соискатель говорит: «С замечанием я согласен, потому что...». Не нужны все эти «потому что...». Согласились с замечанием – двигайтесь дальше.

Если замечание дано по существу, если из него следует, что его автор правильно понимает суть вашей работы и тот аспект, к которому он сформулировал замечание, то вам следует с ним согласиться. Даже если вы согласны лишь на 90%, то, по сути, вы согласны. Мелочи никого не интересуют.

Полезно в таких случаях группировать, например: «Я согласен с первым, вторым и четвертым замечаниями, а по третьему замечанию уточню, что...» Это звучит лучше, чем «С первым замечанием согласен, со вторым замечанием согласен» ... «С четвертым замечанием согласен».

Не соглашаться надо с такими замечаниями, в которых рецензент допустил ошибку.

Если уж разъясняете причину своего согласия, делайте это предельно кратко, например, если оппонент говорит о двух взаимно исключающих утверждениях, вы можете ответить: «Я согласен, во втором случае допущена опечатка».

Если, допустим, рецензент сформулирует замечание в такой форме: «Не понятно, почему одно и то же явление в разных главах называется по-разному», то можно ответить: «Согласен. Такая двойственность терминологии исторически сложилась в литературе. Видимо, надо было придерживаться одной терминологии, оговорив в начале все применяющиеся в литературе варианты этого термина».

Но если рецензент сформулирует замечание так: «Не понятно, почему одно и то же явление в разных главах называется по-разному. Если такая двойственность терминологии исторически сложилась, то надо было придерживаться одной терминологии, оговорив в начале все применяющиеся в литературе варианты этого термина», то ответить надо кратко: «Согласен».

Зачитывать замечание нет необходимости. Лучше его вынести на плакат (слайд) и отвечать сразу же, или – в крайнем случае – кратко обозначив, например «С замечанием о двойственности терминологии – согласен».

Намного полезнее успешно «разбить» одно самое сильное против вас замечание, а с остальными согласиться, чем стараться оспаривать все замечания и лишь произвести впечатление человека, не воспринимающего

критику.

Умение согласиться с сильным доводом против вас – это важное свойство ученого. Поэтому то, как вы отвечаете на справедливые замечания, работает против вас или за вас, смотря по тому, насколько ваши слова корректны, аргументированы, убедительны и вместе с тем кратки.

Точно так же, как соискатель учит свой доклад, надо репетировать и ответы на уже имеющиеся у вас замечания ведущей организации, официальных оппонентов, руководителя и замечания в полученных отзывах.

Иногда бывает фраза «спасибо за вопрос» или «вопрос понятен, отвечаю».

Вторая фраза вообще излишня. Первая фраза может прозвучать во время защиты не более одного раза. Это в том случае, если вопрос, действительно позволяет чуть глубже раскрыть ту часть, которую вы хотели бы раскрыть, но не успели в связи с регламентом. Но помните, что такая ситуация работает против вас: ведь если у вас есть какая-то изюминка, которую вы хотели бы раскрыть, то вам не следует ее оставлять для ответов на вопросы – вдруг такого вопроса вы не получите? Или вас могут заподозрить в сговоре с тем, кто задал этот вопрос. Так же точно двусмысленно звучит фраза: «Я ждал этого вопроса». Если ждали, следовательно, построили доклад так, что этот вопрос естественно возникает. Так чего же вы построили свой доклад, если из него возникают естественные вопросы? Ведь это означает, что вы допустили неясность того момента, который обязан быть ясным.

Не превращайте ответы на вопросы во вторую речь по диссертации. Отвечайте так кратко, как только это возможно.

Замечания оппонентов и ведущей организации, а также поступивших отзывов вам заранее известны. Поэтому желательно заранее подготовить слайды для ответа на эти замечания. Проще будет, если они идут непосредственно после последнего слайда презентации доклада и в том порядке, в каком они будут зачитываться ученым секретарем (этот порядок вам известен, а если не известен, поинтересуйтесь у секретаря). На этих же слайдах вы можете подготовить информацию для ответа на замечание.

Если вам для ответа на замечание требуется вернуться к какому-то слайду презентации, лучше продублируйте этот слайд, а сверху напишите «слайд №... из презентации». Тогда вам не придется прокручивать презентацию вперед и назад и лихорадочно искать нужный слайд, заставляя диссертационный совет ожидать результата поиска.

При неожиданных вопросах из зала вам, конечно, придется перелистывать презентацию, но это неизбежная ситуация и вам никто не поставит ее в вину.

Разумеется, некоторые вопросы можно предугадать.

#### 2.10. Вопросы на защите, которые можно предугадать заранее

1. Скажите кратко, в чем же все-таки основной результат вашей работы?
2. В чем основная новизна?
3. В чем самая главная практическая ценность?
4. Какая часть работы вызвала наибольшую трудность?
5. Каким вашим результатом вы сами удовлетворены больше всего?
6. В чем ваш персональный вклад во всех доложенных результатах? (Особенно такой вопрос следует ожидать в случае, если все или почти все работы написаны в соавторстве).
7. Получили ли вы экономический эффект от вашего результата, а если еще нет, то что надо сделать, чтобы его получить? (В последнее время стали разрешать защищать диссертации без явного экономического эффекта, раньше требование экономического эффекта было обязательным, теперь оно может быть заменено существенным увеличением научных знаний, внедрением результатов в учебный процесс и т.п.).
8. В чем отличие ваших результатов от результатов ваших предшественников?
9. В каком направлении надо двигаться дальше в ваших исследованиях?

На последний вопрос не следует отвечать в духе «А вот защищу диссертацию и уйду в коммерцию». Даже если вы собираетесь это делать, не исключено, что в направлении вашего исследования будут работать другие. В момент защиты вы должны позиционировать себя будущим научным руководителем в исследованиях в данной области. Именно для этой цели, для возможности работать в таком качестве люди защищают диссертации. Если вы собираетесь оставить науку или преподавание, то вам научная степень просто не нужна, вы претендуете на чье-то чужое место, тогда и не защищайте ее.

А если защищаете, то не проявляйте неуважения к этому действию.

#### 2.11. Заключительное слово

Не следует давать оценку собственному труду. Это за вас сделают другие. Не следует выпячивать трудоемкость выполненной работы. Научная степень присуждается не за пот, пролитый при работе, а именно за научные достижения. Заключительное слово предоставляется для благодарности научному руководителю, коллегам за помощь и диссертационному совету за внимание. Это должно быть краткой фразой, или двумя фразами. Не надо благодарить родственников, родителей, школьную учительницу и других людей, которые, возможно, также

способствовали вашей защите, но вы это им скажете в другой обстановке после присуждения искомой степени.

#### 2.12. О нелепых отзывах

Не секрет, что некоторые отзывы организует сам соискатель – просит коллег написать (положительный, конечно) отзыв. Это не исключает спонтанного поступления отзывов, но если вы только рассчитываете на это, учтите, что может оказаться, что на вашу диссертацию не поступит ни одного отзыва, что будет свидетельствовать об отсутствии актуальности. Если же вы сами организуете отзывы, помните, что нелепо, когда приходит несколько отзывов от разных ученых, работающих в одной организации, а иногда даже на одной кафедре или в одной лаборатории. Уж лучше было в таком случае им объединиться и написать коллективный отзыв. Впрочем, не запретишь такую ситуацию, просто она выглядит странно.

Нелепо поступление отзывов от непосредственных руководителей соискателя, например, от заведующего кафедрой, где он выполнял исследование, или от декана, ректора, проректора. Эти люди свое мнение могли выразить в документе от организации по месту выполнения работы, это даже входит в их обязанность.

Отзывы от заведующих другими кафедрами или лабораториями, от деканов других факультетов допустимы, если они не являются членами данного диссертационного совета.

Нелепо выглядит отзыв от члена данного диссертационного совета. Этому лицу дается возможность выступления на защите, а также право проголосовать так, как он считает нужным.

Прямого запрета перечисленных видов отзывов нет, но особого смысла в них также нет, это просто затягивает защиту, не повышая ее убедительности.

#### 2.13. О подготовке научных отчетов

Имеются стандарты, определяющие порядок выполнения научно-исследовательской работы, а также форму научных отчетов по выполненным работам [6–11]. Раньше несоблюдение стандартов не допускалось в принципе. В настоящее время государственные стандарты являются рекомендательными, но в конкурсах на выполнение НИР зачастую имеется прямое требование выполнения работ по определенным стандартам. Также зачастую имеется требование выполнения отчета по соответствующим стандартам. В этом случае соблюдение стандарта является обязательным. Также стандарт обязателен к соблюдению в том случае, если на него имеется ссылка как на «источник разработки».

Обратите внимание на то, что если какой-либо документ (не обязательно стандарт, а хотя бы даже инструкция) требует соблюдения некоторой структуры документа, например, перечисляет обязательные разделы, то в данном документе эти разделы обязательно должны присутствовать, и их название должно в точности соответствовать требуемым названиям, перечисленным в этом документе. Соблюдение этого простого правила избавит вас от многих неприятностей.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Батько М.Б. Соискателю ученой степени. <http://www.ipa.nw.ru/smu/files/lib/Batko.pdf>
- [2] Классификаторы УДК: [http://www2.viniti.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=62&Itemid=63](http://www2.viniti.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=62&Itemid=63), <http://nauka.petrus.ru/docs.aspx?id=6043647>, <http://gsnti-norms.ru/norms/norms/0top.htm#udc.htm>, <http://lib.skgmigtu.ru/Default.aspx?tabid=84> и т.п.
- [3] Г.А. Сырецкий. Информатика. Фундаментальный курс. Том 1. Основы информационной и вычислительной техники. БХВ- С.Петербург, Москва. 2005.
- [4] ГОСТ Р 7.0.5–2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления.
- [5] ГОСТ 7.1-2003. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления.
- [6] Классификатор МКИ <http://www.legal-support.ru/information/laws/intellect/mpk7red/>.
- [7] ГОСТ 7.32 – 2001. Отчет о научно-исследовательской работе.
- [8] ГОСТ 7.32–2001. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления.
- [9] ГОСТ 15.101–98. Порядок выполнения научно-исследовательских работ
- [10] ГОСТ 34.602–89 ИТ. КСАС. Техническое задание на создание автоматизированной системы.
- [11] ГОСТ Р 15.201-2000 СРПП. Порядок выполнения научно-исследовательских работ
- [12] ГОСТ Р 15.011–96. Патентные исследования.
- [13] Жмудь В.А., Печорина Т.В. О формировании электронной библиотеки и каталога результатов интеллектуальной деятельности вуза. Автоматика и программная инженерия. 2013. 3(5). С. 75–80.



**Печорина Татьяна Васильевна**, аспирант кафедры финансов и налоговой политики ФГБОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет», [pechorina\\_tatiana@mail.ru](mailto:pechorina_tatiana@mail.ru)



**Вадим Аркадьевич Жмудь** – заведующий кафедрой Автоматики ИГТУ, профессор, доктор технических наук. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника. E-mail: [oao\\_nips@bk.ru](mailto:oao_nips@bk.ru)

## About the typical rules of reporting, reviews and articles and dissertations on engineering science

V.A. ZHMUD, T.V. PECHORINA

*Abstract:* This article is proposed for students and post-graduate students. Experienced scientist treat common rules for the preparation of papers and reports evident, but for students of these rules are rare to find in a brief and concise manner and at the same time with sufficient reasoning and widely available. In addition, fundamental monograph on the subject, as the books of Batko [1] are not always available and in some ways obsolete, since the rules applicable to the dissertation theses change, and in these books, these rules (and their satisfaction) are an essential part of the material.

*Key words:* dissertation, engineering sciences, research reports, articles, scientific review

### REFERENCES

- [1] Bat'ko M.B.. Soiskatelju uchenoj stepeni. URL: <http://www.ipa.nw.ru/smu/files/lib/Batko.pdf>
- [2] Klassifikatory UDK: [http://www2.viniti.ru/index.php?option=com\\_content&task=view&id=62&Itemid=63](http://www2.viniti.ru/index.php?option=com_content&task=view&id=62&Itemid=63), <http://nauka.petrus.ru/docs.aspx?id=6043647>, <http://gsnti-norms.ru/norms/norms/0top.htm#udc.htm>, <http://lib.skgmigtu.ru/Default.aspx?tabid=84> and so on.
- [3] G.A. Syreckij. Informatika. Fundamental'nyj kurs. Tom 1. Osnovy informacionnoj i vychislitel'noj tehniky. BHV- S.Peterburg, Moskva. 2005.
- [4] ГОСТ R 7.0.5–2008. Sistema standartov po informacii, bibliotecnomu i izdatel'skomu delu. Bibliograficheskaja sсыlka. Obshhie trebovanija i pravila sostavljenija.
- [5] ГОСТ 7.1-2003. Sistema standartov po informacii, bibliotecnomu i izdatel'skomu delu. Bibliograficheskaja zapis'. Bibliograficheskoe opisanie. Obshhie trebovanija i pravila sostavljenija.
- [6] Klassifikator MКИ <http://www.legal-support.ru/information/laws/intellect/mpk7red/>.
- [7] ГОСТ 7.32 – 2001. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote.
- [8] ГОСТ 7.32–2001. Otchet o nauchno-issledovatel'skoj rabote. Struktura i pravila oformlenija.
- [9] ГОСТ 15.101–98. Porjadok vypolnenija nauchno-issledovatel'skih rabot
- [10] ГОСТ 34.602–89 ИТ. КСАС. Tehnicheskoe zadanie na sozdanie avtomatizirovannoj sistemy.
- [11] ГОСТ R 15.201-2000 СРРРР. Porjadok vypolnenija nauchno-issledovatel'skih rabot
- [12] ГОСТ R 15.011–96. Patentnye issledovanija.
- [13] Zhmud' V.A., Pechorina T.V. O formirovanii jelektronnoj biblioteki i kataloga rezul'tatov intellektual'noj dejatel'nosti vuza. Avtomatika i programmnaia inzhenerija. 2013. 3(5). p. 75–80.



**VI. Дискуссии. Форум.  
К сведению авторов.**

### **Содержание раздела:**

- Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия» Автоматика и программная инженерия 2015. № 1 (11). С. 128–130.

# Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия»

## ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА

Автоматика, робототехника, автоматизированные системы, программные системы и средства (программная инженерия), защита информации, сетевые технологии, программные платформы, мультиагентные системы, облачные технологии, инновации, информационные технологии, моделирование систем, свободное и открытое программное обеспечение.

## ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ ЖУРНАЛА

Научные, педагогические и инженерные кадры, аспиранты, докторанты и студенты, представители бизнеса в области информационных технологий и автоматике.

## ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

К опубликованию принимаются оригинальные научные статьи, ранее не опубликованные ни в каких средствах информации, включая научные и иные журналы и электронные сайты.

Не допускается дословное цитирование без кавычек из чужих источников (плагиат) и из своих источников (автоплагиат), допускается опубликование ранее опубликованных иллюстраций и уравнений, если это требуется для понимания текста. Иллюстрации из чужих источников не желательны кроме случаев, когда без их дублирования статью невозможно понять; в этом случае они должны быть снабжены ссылками на эти источники.

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 10 пт через один интервал, заголовок – в одну колонку шрифт 24 пт, литература – 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. Перечень авторов дается на первой странице (только фамилии, И.О. и место работы).

Статья обязательно должна содержать

аннотацию (100 – 200 слов) и ключевые слова (8 – 10 слов или словосочетаний), литературные ссылки, необходимые для понимания статьи и/или с указанием источников цитирования. При этом ссылки на собственные публикации не должны преобладать, желательно, чтобы их количество не превышало 30% общего числа ссылок.

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.

## РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ

Присланные статьи подвергаются внутреннему анонимному рецензированию. Редакционная коллегия вправе отклонить статью от опубликования с указанием причин этого отклонения или предложить доработать статью по замечаниям рецензента.

Статьи, написанные в соавторстве действительных членов РАН или РАЕН, а также статьи, сопровождающиеся положительной рецензией действительных членов РАН или РАЕН (твердая копия с оригинальной подписью, заверенной по месту работы, пересылается по почте), могут быть опубликованы по ускоренной процедуре рецензирования. При этом не исключается предложение редакции о редакторской правке и/или о лучшем качестве иллюстративного материала.

## ОТВЕТСТВЕННОСТЬ АВТОРОВ

Ответственность за отсутствие плагиата, за научное содержание статей и за качество перевода на английский язык лежит на авторе (авторах) публикации. Факт направления статьи в редакционную коллегию трактуется редакционной коллегией как заключение устного договора на передачу прав опубликования данного материала редакционной коллегии, в случае, если статья не будет отклонена. При этом редакционная коллегия

обязуется обеспечить опубликование с открытым доступом, а авторский коллектив обязуется обеспечить отсутствие плагиата, включая автоплагиат, и выполнение других требований, опубликованных в этом разделе.

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 [oaonips@bk.ru](mailto:oaonips@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 подрисовочных подписях следует давать перевод этих подписей).

В случае предоставления авторами статьи только на одном языке, **опубликование на другом языке не гарантируется**. В этом случае по усмотрению редакции может быть опубликовано только краткие сведения (аннотация, ключевые слова, тезисы) или статья в сокращенном виде.

Сопровождение русскоязычной статьи английским переводом названия, ключевых слов и аннотации и транслитерации фамилий авторов редакцией приветствуется: в этом случае указанные сведения помещаются в конце статьи.

Желательно указание индекса УДК и (или) МКИ.

Допускается прием к опубликованию статей только на английском языке для англоязычных авторов. В этом случае по усмотрению редакции либо англоязычная версия публикуется в русскоязычной и англоязычной версии журнала, либо редакция осуществляет самостоятельный перевод статьи на русский язык для русскоязычной версии.

### ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ

Редакционная коллегия предлагает соблюдать сложившиеся стилистические и оформительские признаки стиля АиПИ в части заголовков, подрисовочных подписей, оформления библиографических ссылок и т. д.

Пожалуйста, используйте курсив для латиницы в русскоязычных статьях, для сокращенных наименований физических величин после их численного значения, а также для полных или сокращенных слов «таблица», «рисунок», «приложение», «теорема», «лемма», «пример» и так далее, если после этих слов применена нумерация. При этом полное или сокращенное слово «Рисунок», «Таблица» и т. д. пишется с заглавной буквы. Между точкой после сокращения и цифрой, означающей нумерацию рисунка или таблицы, пожалуйста, используйте символ «неразрывный пробел», который вставляется в текст при одновременном нажатии клавиш *Shift*, *Ctrl* и «пробел». Например, «на *Рис. 2* показано».

Для чисел использовать курсив не следует, кроме случаев, когда числами обозначаются блоки или элементы на рисунке.

Например:  $F_2 = 33,5 \text{ Н}$ .

Не следует использовать наименования физических величин в сокращенном виде в разрыве (вследствие переноса на другую строку) от их численного значения. Чтобы этого избежать, применяйте символ «неразрывный пробел». Также не применяйте эти сокращенные наименования, а также знаки математических операций при отсутствии численного значения.

Например, некорректным по этому признаку является фраза: «Сила тока =  $3 \text{ А}$ », или «Сила тока составляет несколько  $\text{А}$ ». Следует применять корректную запись, например: «Сила тока  $I = 3 \text{ А}$ » или «Сила тока составляет несколько *Ампер*».

При написании формул используйте соответствующее программное обеспечение Math, встраиваемое в Word.

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:  $\exp$ ,  $\sin$ ,  $\cos$ ,  $\log$ ,  $\lg$ ,  $\ln$ ,  $\text{mod}$ ,  $\text{max}$ ,  $\text{min}$  и так далее – пишутся без курсива.

Статьи, оформленные с существенными нарушениями требований к оформлению, могут быть отклонены от опубликования на этом основании.

### О РАЗДЕЛЕ «ДИСКУССИИ. ФОРУМ»

В раздел «Дискуссии. Форум» принимаются

статьи, которые могут положить начало дискуссиям по актуальным вопросам в русле тематики журнала «АиПИ».

Статьи данного раздела не подвергаются строгому научному рецензированию, а именно: при наличии как положительных, так и отрицательных рецензий, либо при несовпадении точки зрения авторов с точкой зрения большинства членов редакционной коллегии, статьи могут быть опубликованы в этом разделе на правах дискуссионного выступления автора. Редакционная коллегия приветствует научные дискуссии сторонников несовпадающих мнений с целью развития теорий. Редакционная коллегия призывает читателей присылать отклики на статьи, опубликованные в разделе «Дискуссии». Избранные отклики на статьи раздела «Дискуссии» также как избранные мотивированные отклики на другие статьи журнала «АиПИ» будут публиковаться в разделе «Форум» (по усмотрению редакции – в сокращении или в конспективном изложении).

#### **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 <http://translit.net/>. Если вы ссылаетесь на публикацию нашего журнала, пожалуйста, используйте англоязычное название в списке для англоязычных читателей, а именно: Automatics & Software Enginery. Аналогично если журнал выходит на двух языках, русском и английском, мы убедительно просим авторов в русскоязычной версии ссылок давать ссылку на русский вариант издания, а в англоязычной версии – ссылку на английский вариант издания. Если при этом страницы соответствующих статей не совпадают, пожалуйста, используйте правильные страницы публикаций. Если вы знакомы со статьей только по англоязычному варианту, либо если статья написана только на английском или другом иностранном языке, в этом случае ссылка на нее в каждом из переченей дается на языке оригинала.

# Content

<b>I. Automation. Automated Systems</b>	<b>7</b>
Research of the Real Sliding Mode in "Inverted Pendulum" Model System Andrew Sazhin, Galina Sablina	9
Development of Stabilization Algorithm of «Rotating Pendulum» Modeling System Ivan Stazhilov	16
Robust Design of Resource-Saving Dual-Channel Regulator for an Object with a Single Output V.A. Zhmud, V.M. Semibalamut, L.V. Dimitrov	22
Comparative Analysis of the Capabilities of Typical Regulators with Regulators by Localization Method G.A. Frantsuzova, E.P. Tolstokoneva, N.Y. Shilkova	29
<b>II. Robotics. Software and Systems. Telemechanics and Telemetry</b>	<b>35</b>
Method of Blocky Sporadic Data Transfer with the Telemetry Aperture Dynamically Determination in the Remote Control Systems A.G. Zebzeev	37
Exchange of Data between the Computer and the Microcontroller STM32F100 by Serial Communication Interface RS-232 V.A. Zhmud, I.V. Trubin, M.V. Trubin	45
The Modernization of the Mathematical Model of Vacuum Cleaner Robot E.V. Agapov, V.N. Nikulin	52
<b>III. Innovative Technologies. Promising Technologies. Simulation of Systems. Numerical optimization</b>	<b>55</b>
Regulator with Division of "Right" and "Wrong" Movements V.A. Zhmud, M.V. Trubin	57
Neuro and Indistinct Modeling of Changes of Levels of Earth Waters Kegeyli Groundwater Intakes M.A. Iztilewov, N.R. Rakhimov, R.I. Oteniyazov	63
<b>IV. Measuring Means and Systems. Identification</b>	<b>68</b>
Designing of Touch-Sensoring Buttons on the Base of Chip TTP-224 V.A. Zhmud, M.V. Trubin, I.V. Trubin	70
Using of Measuring System MPU6050 for the Determination of the Angular Velocities and Linear Accelerations D.S. Fedorov, A.Y. Ivoylov, V.A. Zhmud, V.G. Trubin	75
Two-Step Quasi-Optimal Algorithm of Wavelet Filtering of Signals and Images Yu.E. Voskoboynikov	81
Identification of Nonlinear Systems of Direct Air Heating K. Yu. Lastochkin, I. O. Prikhodko	90
The Use of Modular Arithmetic in Phase Measurements V.I. Guzhov, E.S. Kabak, I.S. Orlov	97
<b>V. Popular Papers. Intriduction into Spesialities</b>	<b>108</b>

About the typical rules of reporting, reviews and articles and dissertations on engineering science V.A. Zhmud, T.V. Pechorina	110
<b>VI. Discussions. Forum. Information for Authors</b>	<b>126</b>
Requirements for Publication in Scientific Electronic Journal "Automation and Software Engineering"	128

ISSN 2312-4997

