

ISSN 2312-4997

АВТОМАТИКА и ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

2016 N 3(17)

Automatics & Software Engineering - 2016/3(17)

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:

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

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

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

УДК 681.2; 681.3; 681.5; 681.7

Автоматика и программная инженерия (Automatics & Software Enginery) № 3(17), 2016,
ISSN 2312-4997. Основан в июне 2012 г.

Учредитель журнала:

Открытое акционерное общество «Новосибирский институт программных систем»
Сайт организации: 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: oaonips@bk.ru
web: <http://www.jurnal.nips.ru/>

Подписано в печать 7 октября 2016 г.

Оглавление

<i>I. Автоматика. Автоматизированные системы.....</i>	<i>7</i>
Кафедра Автоматики НГТУ: пятьдесят лет успеха	9
О применении АЦП с сигма-дельта модуляцией в режиме коммутации.....	16
Рекомендации по быстрой разработке макетов цифровых систем управления на базе микроконтроллеров	25
<i>II. Робототехника. Электроника. Программные средства и системы.</i>	<i>32</i>
Требования к компоненту визуализации виртуального окружения в имитационных системах.....	34
<i>III. Инновационные технологии. Перспективные технологии.</i>	<i>41</i>
<i>Моделирование систем. Численная оптимизация.....</i>	<i>41</i>
Влияние вида тестовых сигналов на результат численной оптимизации регуляторов...43	
Обоснование применения сигналов сложной формы при численной оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления.....	54
Новый подход к задаче проектирования робастных регуляторов	59
<i>IV. Измерительные средства и системы. Идентификация.</i>	<i>65</i>
<i>Телемеханика и телеметрия.....</i>	<i>65</i>
Разработка программы управления макетом химического реактора с использованием метода типовых регуляторов	67
Система мобильного мониторинга сердечной деятельности человека: о применимости различных методов фильтрации электрокардиосигнала.....	76
Выбор наилучшей двухпараметрической пороговой функции в алгоритмах вейвлет-фильтрации.....	91
<i>V. Популярные статьи. Введение в специальность.</i>	<i>99</i>
Научная школа профессора А.С. Вострикова. К юбилею основателя	101
Научная школа академика С.Н. Багаева. К юбилею основателя	110
<i>VI. Дискуссии. Форум. К сведению авторов.....</i>	<i>126</i>
Системы автоматического управления высшей точности	128
Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия».....	137
Content	140

**I. Автоматика.
Автоматизированные системы.**

Содержание раздела:

- Г.А Французова, В.Г. Трубин. Кафедра Автоматики НГТУ: Пятьдесят лет успеха. ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 9–15.
- В.А. Жмудь. О применении АЦП с сигма-дельта модуляцией в режиме коммутации. ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 16–24.
- В.А. Жмудь, А.Ю. Ивойлов, В.Г. Трубин. Рекомендации по быстрой разработке макетов цифровых систем управления на базе микроконтроллеров. ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 25–31.

Кафедра Автоматики НГТУ: пятьдесят лет успеха

Галина Французова, Виталий Трубин
ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск

Аннотация: В текущем году кафедра Автоматики отпраздновала свой пятидесятилетний юбилей. Кафедра стояла у истоков создания журнала «Автоматика и программная инженерия», и до сих пор многие сотрудники кафедры являются членами редакционной коллегии журнала. Редакционная коллегия считает целесообразным ознакомить читателей с основными направлениями деятельности кафедры, ее научными результатами, а также с отличительными преимуществами учебы на кафедре для студентов. Эти преимущества достигнуты совместными усилиями преподавателей кафедры.

Ключевые слова: Автоматика, высшее образование, робототехника, управление

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время кафедра Автоматики реализует подготовку студентов и аспирантов по направлениям «Управление в технических системах» и «Информатика и вычислительная техника» [1]. При этом реализуются все следующие уровни подготовки: бакалавриат, магистратура, аспирантура, докторантура. Ежегодно кафедра публикует несколько десятков статей, входящих в наукометрическую базу «Scopus», «Web of Sciences», около полусотни публикаций, входящих в базу РИНЦ. Также кафедра издает не менее одной монографии и несколько учебных пособий ежегодно, оформляет несколько патентов на изобретение или свидетельств на регистрацию программ для ЭВМ.

Кафедра реализует подготовку студентов по программам двойного диплома (уровень подготовки – магистратура) совместно с университетами Чехии (Технический университет города Люберец), Болгарии (Технический университет Софии) [2]. Также один студент в настоящее время обучается по аналогичной программе в Германии, сотрудничество с университетом г. Зиген в настоящий момент нацелено на организацию совместной подготовки аспирантов. Фактически уже реализуется совместная подготовка аспирантов с университетом Чехии.

Также ведутся переговоры о достижении аналогичных соглашений с университетом Блеза Паскаля в г. Клермон-Ферран (Франция).

Программа двойного диплома позволяет

студенту за один общий срок обучения выполнить программу обучения двух вузов, один из которых зарубежный. Это основывается на достигнутых соглашениях о признании учебных планов идентичными или взаимозаменяемыми. Поскольку оба вуза признают обучение и результаты контрольных оценок друг друга, это позволяет реализовать в каждом из двух вузов только одну часть подготовки при условии, что вся программа подготовки в целом будет соответствовать учебному плану каждого из университетов. На этом основании выпускнику выдаются дипломы обоих вузов. В частности, отметим, что дипломы Чехии признаются всеми странами Европы, Америки, Австралии, не требуют нострификации.

1. КРАТКАЯ ИСТОРИЯ КАФЕДРЫ

Подготовка специалистов по автоматике в Новосибирском государственном электротехническом институте (НЭТИ, так назывался тогда НГТУ) началась на радиотехническом факультете с 1958 года.

Кафедра называлась «Автоматики, телемеханики и электроизмерительной техники» (АТиЭИТ). С 1961 года подготовка проходила на приборостроительном факультете (ПСФ), а в 1963 году образован факультет автоматики, математических и счетно-решающих приборов и устройств (АМФ).

По приказу министра образования РСФСР № 282 от 16 мая 1966 года о разделении кафедры АТиЭИТ выделяется кафедра «автоматики и телемеханики». Позднее название кафедры сократилось, но именно с этой даты кафедра Автоматики отсчитывает срок своего существования.

С указанного срока на кафедре не было существенных структурных изменений, не считая создания лабораторий и научно-образовательного центра «САУМИР» (Системы автоматического управления, мехатроники и робототехники).

С 1966 года кафедру возглавляли:

- к.т.н., доцент Бреже Юрий Карлович – 1966-1971 г.
- к.т.н., доцент Васильев Владимир Иванович – 1971 г.,
- к.т.н., доцент Востриков Анатолий Сергеевич – 1971-1972 г.,
- к.т.н., доцент Сидоров Владимир

- Михайлович – 1972-1976 г.,
- к.т.н., доцент Сеньошкин Владимир Евгеньевич – 1976-1978 г.,
- к.т.н., доцент Сидоров Владимир Михайлович – 1978-1979 г.,
- к.т.н., доцент Берсенев Юрий Федорович – 1979-1984 г.,
- д.т.н., профессор Востриков Анатолий Сергеевич – 1984-1990 г.,
- к.т.н., доцент Гаврилов Евгений Борисович – 1990-1993 г.,
- д.т.н., профессор Востриков Анатолий Сергеевич – с 1993 г. по 2009 г.,
- д.т.н., профессор Жмудь Вадим Аркадьевич – с 2009 г. по настоящее время.

Нельзя не вспомнить и доцента Леонида Ионовича Ганджу, деятельными усилиями которого создавалась и организовывалась кафедра.

За время работы кафедрой подготовлено свыше 4 тысяч инженеров, бакалавров и магистров, 10 докторов и более 60 кандидатов наук, обучено более 270 аспирантов.

2. ФОРМЫ ОРГАНИЗАЦИИ УЧЕБНОГО ПРОЦЕССА:

Дневная и заочная (бюджетная и контрактная).

Кафедра осуществляет подготовку бакалавров и магистров по направлениям:

- 270000 «Автоматизация и управление»
- 090000 «Информатика и вычислительная техника»

Подробную информацию, включая учебные планы и календарные планы графики, можно найти на сайте университета [3].

Учебная база кафедры детально описана в статье [1]. Поэтому можно остановиться отдельно на том, как развивается учебная база в последние годы. Развитие кафедры тесно связано с выполнением научных исследований.

3. НАУЧНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КАФЕДРЫ

В последние годы кафедра успешно выполнила исследования по следующим тематикам:

- I. Новые наноструктуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности (научный руководитель – зав. кафедрой, доцент В.А. Жмудь), 2014–2016 г.
- II. Разработка алгоритмов управления для нелинейных динамических объектов при неполной информации на основе формирования разнотемповых процессов (научный руководитель – профессор В.Д. Юркевич), 2014–2016 г.
- III. Разработка и исследование алгоритмов идентификации объектов управления с сосредоточенными и распределенными

параметрами, с целью построения адаптивных систем управления и регулирования (научный руководитель – зав. кафедрой, доцент В.А. Жмудь), 2015 г.

- IV. Разработка лазерной технологии формирования углоизмерительных структур на основе 3-D объемных фазовых решеток (научный руководитель – доцент В.А. Кирьянов), 2013 г.
- V. Алгоритмы интеграции данных цифровых камер и тактильных датчиков в систему управления человекоподобным роботом (научный руководитель – доцент А.Б. Колкер), 2012–2013 г.
- VI. Исследование предельных точностей оптическими методами измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка новых робототехнических и электромеханических систем (научный руководитель – зав. кафедрой, доцент В.А. Жмудь), 2012–2013 г.
- VII. Разработка программного обеспечения вычислительной техники и автоматизированных систем (научный руководитель – профессор А.А. Воевода), 2011–2012 г.

4. НАУЧНАЯ ШКОЛА КАФЕДРЫ

Руководитель научной школы «Синтез систем автоматического регулирования» - профессор Анатолий Сергеевич Востриков, Лауреат Премии Президента Российской Федерации в области образования, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, Академик МАН ВШ, награжден орденом Почета.



Профессор А.С. Востриков, руководитель научной школы «Синтез систем управления»

Ученый с мировым именем, А.С. Востриков является автором оригинального общего подхода к формированию алгоритмов управления для

широкого класса нелинейных нестационарных динамических объектов, названного «принципом локализации». На базе предложенного принципа были разработаны конкретные методы проектирования различных типов систем автоматического регулирования, функционирующих в условиях действия неконтролируемых внешних возмущений и неопределенности параметров. За прошедшие годы в рамках школы под руководством Анатолия Сергеевича подготовлены 10 докторов и 30 кандидатов наук. Также он является научным руководителем научно-образовательного центра Системы адаптивного управления, мехатроники и робототехники" при кафедре Автоматики НГТУ (НОЦ "САУМиР").

Центр создан на базе лабораторий:

- Лаборатория промышленных систем автоматики, VII-404
- Лаборатория систем передачи данных, VII-403
- Лаборатория электромеханических систем, VII-402
- Лаборатория беспроводных систем передачи данных, VII-418
- Лаборатория промышленных контроллеров, VII-504
- Лаборатория специализированных контроллеров, VII-505

Лидером другой научной школы «Синтез многоканальных регуляторов» является профессор, член-корреспондент МАН ВШ, доктор технических наук Александр Александрович Воевода.



Профессор А.А. Воевода, руководитель научной школы «Синтез многоканальных регуляторов»

Под научным руководством А.А. Воеводы успешно защищены более десятка кандидатских диссертаций.

5. ЗАЩИТА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

Кафедра активно участвует в создании интеллектуальной собственности: изобретений, полезных моделей и программных продуктов. За последние годы кафедрой получен ряд патентов на изобретения и полезные модели [4–12], а также свидетельства о регистрации программных продуктов [13–20]. В настоящее время еще на стадии оформления имеется три заявки.



Титульный лист монографии А.С. Вострикова с соавторами

6. МЕЖДУНАРОДНАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ

Кафедра активна в участии в международных программах и проектах. В 2010 году кафедра совместно с Технологическим университетом г. Сурат (Индия) организовала «Международный семинар по Компьютерному интеллекту и Эвристическим методам в автоматике и робототехнике» - «СІМННН-2010». В следующем году такой же семинар «СІМННН-2010» был организован в НГТУ силами кафедры с приглашением 10 ученых из Индии [5]. В настоящее время на кафедре обучаются два иностранных аспиранта (из Узбекистана) и проходит стажировку аспирант из Финляндии. Кафедра участвует в реализации проекта по разработке и реализации совместных образовательных программ *TEMPUS-MPAM* по автоматике и мехатронике [6].

7. ЛАБОРАТОРИЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОНТРОЛЛЕРОВ

Лаборатория была образована в середине 90-х годов прошлого столетия. Первоначальное название лаборатории было «Микроконтроллеры Motorola». Она входила в «Сибирский центр международного сотрудничества»,

который возглавлял к.т.н. Суворов А.В. В то время были популярны 8-ми разрядные микроконтроллеры (МК) серий *HC05* и *HC11* фирмы *Motorola* [17]. Программы создавали на ассемблере. Процесс разработки был утомителен, т.к. были либо однократно программируемые, либо с ультрафиолетовым стиранием МК. Бывало так, что после написания программы и программирования МК обнаруживалась ошибка. После этого приходилось ждать около 10-15 минут, пока сотрётся память под УФ-лампой. Количество циклов перепрограммирования МК с ультрафиолетовым стиранием было от 25 до 100. После этого МК использовать уже было нельзя. Пробовали даже делать значки из таких МК, настолько жаль было выбрасывать такие красивые, но функционально бесполезные детали. Впоследствии приспособились отлаживать программы по частям в ОЗУ и дописывать их в (УФ) ПЗУ. Потом появились МК с *Flash* памятью. Это было счастье, поистине революционный скачок. Можно было перезаписать программу несколько раз за одну минуту, правда, количество циклов перепрограммирования МК было от 100 до 1000.

Потом пришла очередь языка высокого уровня Си. Вначале было скептическое отношение к компилятору Си. Разработчики думали, что использование этого языка будет не оптимальным по размеру и быстродействию кода. Но после анализа кода на Си, и скомпилированного кода на ассемблере, выяснилось, что коэффициент избыточности объёма кода колебался от 1,25 до 1,6. После этого разработчики по достоинству оценили компилятор *Cosmic*. Безусловно, писать программы на Си было быстрее и комфортнее. Правда, были и особенности. Если написать очень сложное выражение, то скомпилированный вариант был очень

громоздким и занимал много памяти. Поработав несколько месяцев, разработчики научились писать программы, которые хорошо выглядят и оптимально компилируются. В 2000-х интерес вызвали цифровые сигнальные процессоры фирмы *Texas Instruments*. Благодаря наличию большого количества аппаратно разделённых подсистем, высокой скорости и большой разрядности, стало возможным создание цифровых регуляторов на порядок и более быстрых, чем удавалось разрабатывать на восьмиразрядных микроконтроллерах *Motorola*. Потом *DSP* семейства *C2000* оснастили обычными периферийными модулями (АЦП, последовательные интерфейсы, таймеры и т.п.), которые присущи микроконтроллерам, и перевели данный класс *DSP* в микроконтроллеры.

В 2000-х годах большую поддержку лаборатории оказал д.т.н. А.С. Востриков.

После 2010 года рынок начал активно наполняться МК с *ARM*-архитектурой. Эта архитектура оказалась настолько удачной, что лицензии купили многие производители полупроводников: *AMD, Apple, Analog Devices, Atmel, Xilinx, Altera, Cirrus Logic* (англ.), *Intel* (до 27 июня 2006 года), *Marvell* (англ.), *NXP, STMicroelectronics, Samsung, LG, MediaTek, MStar, Qualcomm, Sony, Texas Instruments, nVidia, Freescale*, Миландр, *HiSilicon* [21]. Поэтому вполне логичным был переход на 32-х разрядные МК с *ARM* архитектурой фирмы *STMicroelectronics*.

Лаборатория входит в состав кафедры «Автоматики» НГТУ, и уже более 20-и лет, начиная с самого основания, лабораторией заведует Виталий Геннадьевич Трубин. В лаборатории сложилась настоящая династия: за последние 8 лет большой вклад в работу лаборатории внёс И.В.Трубин, также к работе приобщается М.В.Трубин.



Династия Трубиных: И.В. Трубин, В.Г. Трубин, М.В. Трубин

В своей работе лаборатория руководствуется принципом Томаса Эдисона: «Показывать саму вещь, а не её призрак». Поэтому обучение студентов производится на реальных установках, как говорится на жаргоне разработчиков – «на реальном железе». Студенты разрабатывают, собирают, программируют, отлаживают, сжигают схемы, и становятся специалистами с реальным опытом отладки, настройки и ремонта электронных узлов. Помимо основных занятий лаборатория проводит дополнительные, где студенты могут закрепить и расширить свои знания в свободное от учёбы время. Благодаря навыкам, полученным в лаборатории, и на кафедре, часть студентов находит интересную работу по избранной специальности, пополняют ряды инженеров и ученых нашей страны.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Д.С. Худяков, Е.В. Прохоренко, В.А. Жмудь. Кафедра Автоматики НГТУ и ее научная школа. Автоматика и программная инженерия. С. 105–115. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- [2] В.А. Жмудь, Г.А. Французова. Программа двойных магистерских дипломов по «Мехатронным системам и автоматике» между НГТУ и техническими университетами Болгарии и Чехии. Автоматика и программная инженерия. С. 116–124. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- [3] Сайт НГТУ: учебные планы. http://www.nstu.ru/education/edu_plans
- [4] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2541684. Заявка № 2013146115, приоритет от 15.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 15 января 2015 г. Срок действия патента истекает 25.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 5.
- [5] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2566339. Приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 20 октября 2015 г. Бюлл. № 29. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36.
- [6] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2584925. Приоритет от 05.03.15. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.04.16. Бюллетень № 14. Срок действия патента истекает 05.03.35. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [7] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Регулятор для систем с обратной связью. Патент РФ RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Оpubл.27.09.08. Бюл. № 27. Заявка № 2008108410/22 от 04.03.2008, правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [8] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упредителя Смита. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 57–67.
- [9] STM32VLDISCOVERY – платформа для построения простой системы сбора данных. Лабораторная работа: учеб.-метод. пособие / В. А. Жмудь, В. Г. Трубин, А. В. Ескин, А. Л. Печников. - Новосибирск : Издательство НГТУ, 2014. - 174 с. - 50 экз. - ISBN 978-5-7782-2599-2.
- [10] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2540461. Заявка № 2013145173, приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 19 декабря 2014 г. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 4.
- [11] Пат. 2554291, МПК G01R 23/02, G01P 3/36. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью / В. А. Жмудь, А. Н. Загорин; НГТУ - 2014112628; заяв. 01.04.14; опуб. 27.06.15. - 9 с.
- [12] Пат. 2015617101, МКИ. MPU6050_Alfa_beta_filter / В. А. Жмудь, А. Ю. Ивойлов, В. Г. Трубин, Д. С. Федоров; НГТУ - 2015614030; заяв. 18.05.15; опуб. 30.06.15.
- [13] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «EdpCtrlServer_v004.py» № 2014612791, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». Авторы: Печников Андрей Львович, Трубин Виталий Геннадьевич, Жмудь Вадим Аркадьевич. Заявка № 2013660275, дата поступления 11 ноября 2013 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014 г.
- [14] Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «EdpCtrlClient_v004.py» № 2014612792, правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». Авторы: Печников Андрей Львович, Трубин Виталий Геннадьевич, Жмудь Вадим Аркадьевич. Заявка № 2013660287, дата поступления 11 ноября 2013 г., дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 06 марта 2014 г.
- [15] Свидетельство о регистрации программы для ЭФМ № 2012618604 DamMonitorNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2012616410 от 27 июля 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 21 сентября 2012 г.
- [16] Свидетельство о регистрации программы для ЭФМ № 2013611161 ZipDataFlowNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660916 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [17] Свидетельство о регистрации программы для ЭФМ № 2013611162 DefProcNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка № 2012660917 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [18] Свидетельство о регистрации программы для ЭФМ № 2013611164 FlashReadNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Заявка №

- 2012660919 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [19] Свидетельство о регистрации программы для ЭФМ № 2013613341 ZScannerNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2013611238 от 13 февраля 2013 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 02 февраля 2013 г.
- [20] Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2013611160 FreqAndAllanLabNSTU. Правообладатель: ФГБОУ ВПО НГТУ. Россия. Авторы: Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Заявка № 2012660915 от 11 декабря 2012 г. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 9 января 2013 г.
- [21] Справочник по средствам автоматизации /Под ред. Низэ В.Э., Антика И.В. - М.: Энергоатомиздат, 1989.
- [6] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2584925. Prioritet ot 05.03.15. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 27.04.16. Bjulleten' № 14. Srok dejstvija patenta istekaet 05.03.35. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [7] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Reguljator dlja sistem s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.27.09.08. Bjul. № 27. Zajavka № 2008108410/22 ot 04.03.2008, pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [8] V.A. Zhmud', O.D. Jadryshnikov. Optimizacija reguljatora dlja mnogokanal'nyh ob#ektov s razvitiem idei upreditelja Smita. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2014. № 1 (7). S. 57–67.
- [9] STM32VLDISCOVERY – platforma dlja postroenija prostoj sistemy sbora dannyh. Laboratornaja rabota: ucheb.-metod. posobie / V. A. Zhmud', V. G. Trubin, A. V. Eskin, A. L. Pechnikov. - Novosibirsk : Izdatel'stvo NGTU, 2014. - 174 s. - 50 jezk. - ISBN 978-5-7782-2599-2.
- [10] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2540461. Zajavka № 2013145173, prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 19 dekabnja 2014 g. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 4.
- [11] Pat. 2554291, MPK G01R 23/02, G01P 3/36. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju / V. A. Zhmud', A. N. Zavorin; NGTU - 2014112628; zajav. 01.04.14; opub. 27.06.15. - 9 c.
- [12] Pat. 2015617101, MKI. MPU6050_Alfa-beta_filter / V. A. Zhmud', A. Ju. Ivojlav, V. G. Trubin, D. S. Fedorov; NGTU - 2015614030; zajav. 18.05.15; opub. 30.06.15.
- [13] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM «EdpCtrlServer_v004.ru» № 2014612791, pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Novosibirskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet». Avtory: Pechnikov Andrej L'vovich, Trubin Vitalij Gennad'evich, Zhmud' Vadim Arkad'evich. Zajavka № 2013660275, data postuplenija 11 nojabrja 2013 g., data gosudarstvennoj registracii v Reestre programm dlja JeVM 06 marta 2014 g.
- [14] Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlja JeVM «EdpCtrlClient_v004.ru» № 2014612792, pravoobladatel': Federal'noe gosudarstvennoe bjudzhetnoe obrazovatel'noe uchrezhdenie vysshego professional'nogo obrazovanija «Novosibirskij gosudarstvennyj tehničeskij universitet». Avtory: Pechnikov Andrej L'vovich, Trubin Vitalij Gennad'evich, Zhmud' Vadim Arkad'evich. Zajavka № 2013660287, data postuplenija 11 nojabrja 2013 g., data gosudarstvennoj registracii v Reestre programm dlja JeVM 06 marta 2014 g.
- [15] Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeFM № 2012618604 DamMonitorNSTU. Pravoobladatel': FGBOU VPO NGTU. Rossija. Avtory: Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Zajavka № 2012616410 ot 27 ijulja 2012 g. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 21 sentjabrja 2012 g.
- [16] Svidetel'stvo o registracii programmy dlja JeFM № 2013611161 ZipDataFlowNSTU. Pravoobladatel': FGBOU VPO NGTU. Rossija. Avtory: Tereshkin D.O., Zhmud' V.A. Zajavka № 2012660916 ot 11

Department of Automation: Fifty Years of Success

G.A. FRANTSUZOVA, V.G. TRUBIN

Abstract: In the current year, the Department of Automation celebrates its fiftieth anniversary. The Department was one of the founders of the journal “Automation and Software Engineering”, and until now, many members of the Department are members of the Editorial Board. The Editorial Board considers it appropriate to acquaint readers with the main activities of the Department, its research results, as well as the distinctive advantages of studying at the Department for students. These benefits are achieved through the joint efforts of teachers of the Department.

Key words: Automation, higher education, robotics, control

REFERENCES

- [1] D.S. Hudjakov, E.V. Prohorenko, V.A. Zhmud'. Kafedra Avtomatiki NGTU i ee nauchnaja shkola. Avtomatika i programmaja inzhenerija. S. 105–115. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossija).
- [2] V.A. Zhmud', G.A. Francuzova. Programma dvojnnyh magisterskih diplomov po «Mehatronnym sistemam i avtomatike» mezhdju NGTU i tehničeskimi universitetami Bolgarii i Chehii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. S. 116–124. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossija).
- [3] Sajt NGTU: uchebnye plany. http://www.nstu.ru/education/edu_plans
- [4] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2541684. Zajavka № 2013146115, prioritet ot 15.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 15 janvarja 2015 g. Srok dejstvija patenta istekaet 25.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 5.
- [5] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2566339. Prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobretenij RF 20 oktjabrja 2015 g. Bjull. № 29. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36.

dekabrja 2012 g. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 9 janvarja 2013 g.

[17] Svidetel'stvo o registraciji programmy dlja JeFM № 2013611162 DefProcNSTU. Pravoobladatel': FGBOU VPO NGTU. Rossija. Avtory: Tereshkin D.O., Zhmud' V.A. Zajavka № 2012660917 ot 11 dekabrja 2012 g. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 9 janvarja 2013 g.

[18] Svidetel'stvo o registraciji programmy dlja JeFM № 2013611164 FlashReadNSTU. Pravoobladatel': FGBOU VPO NGTU. Rossija. Avtory: Tereshkin D.O., Zhmud' V.A. Zajavka № 2012660919 ot 11 dekabrja 2012 g. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 9 janvarja 2013 g.

[19] Svidetel'stvo o registraciji programmy dlja JeFM № 2013613341 ZScannerNSTU. Pravoobladatel': FGBOU VPO NGTU. Rossija. Avtory: Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Zajavka № 2013611238 ot 13 fevralja 2013 g. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 02 fevralja 2013 g.

[20] Svidetel'stvo o registraciji programmy dlja JeVM № 2013611160 FreqAndAllanLabNSTU. Pravoobladatel': FGBOU VPO NGTU. Rossija. Avtory: Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Zajavka № 2012660915 ot 11 dekabrja 2012 g. Zaregistrovano v Reestre programm dlja JeVM 9 janvarja 2013 g.

[21] Spravochnik po sredstvam avtomatiki /Pod red. Nizje V.Je., Antika I.V. - M.: Jenergoatomizdat, 1989.



Галина Александровна Французова – профессор кафедры Автоматики в НГТУ, доктор технических наук, автор 160 научных статей и 6 книг по автоматическому управлению. Область научных интересов – теория нелинейных систем автоматического управления, оптимальные и экстремальные системы.

E-mail: frants@sintez.nstu.ru



Виталий Геннадьевич Трубин - зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика».

E-mail: trubin@ngs.ru

О применении АЦП с сигма-дельта модуляцией в режиме коммутации

Вадим Жмудь
ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск

Аннотация. Использование аналого-цифровых преобразователей (АЦП) в режиме коммутации используется традиционно в самых различных электронных схемах для цифрового преобразования нескольких сигналов от нескольких источников средствами одного АЦП. Традиционно такое решение считалось целесообразным, поскольку это, казалось бы, позволяет обеспечить существенное аппаратное упрощение. Следует указать существенные теоретические основания для того, чтобы отказаться от этого решения, поскольку аппаратный выигрыш ничтожен, а потеря точности измерений за счет режима коммутации в каждом канале весьма ощутима. Это мнение далеко не всеми разделяется, поскольку даже разработчики АЦП предусматривают режим коммутации, закладывая его в схемотехническое исполнение АЦП, а также рекомендуя его в инструкциях для пользователей. В данной статье осуществлено сопоставительное исследование работы АЦП в режиме с коммутацией и без коммутации путем моделирования в программе *VisSim*. Для моделирования использован принцип работы АЦП с сигма-дельта модуляцией, поскольку такие АЦП приобретают все большее распространение вследствие их низкой стоимости и высокой точности при достаточном для многих практических случаев быстродействии. Результаты моделирования обосновывают целесообразность отказа от схем с коммутацией.

Ключевые слова: АЦП, коммутация, точность, погрешность, многоканальные преобразователи, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

На ранних стадиях развития аналого-цифровых преобразователей (АЦП) эти устройства были крайне сложными для производства. Они изготавливались на множестве отдельных микросхем, требовали использования в своем составе высокоточных резисторов и источников опорных напряжений, ключей, регистров, сравнивающих устройства. Фактически АЦП представляли собой отдельный модуль (печатную плату с элементами), дорогостоящий и достаточно объемный. Коммутация сигналов могла осуществляться на реле, транзисторных ключах или ключах на полевых транзисторах. Запоминание аналоговых сигналов на время преобразования осуществлялось на устройствах выборки-хранения (УВХ), которые представляли собой последовательно соединенные ключ и повторитель, имеющий запоминающий конденсатор на своем входе. Ключи и УВХ были намного проще, чем АЦП, достигаемая точность АЦП соответствовала десяти-двенадцати разрядам. Поэтому если коммутация и вносила небольшую дополнительную погрешность, для АЦП малой разрядности это не ощущалось, а аппаратная экономия оправдывала себя.

В данной статье исследуется целесообразность такого решения методом математического моделирования работы АЦП, работающего по принципу сигма-дельта модуляции.

1. ПРОСТЕЙШАЯ СТРУКТУРНАЯ СХЕМА АЦП

Простейший АЦП содержит вычитающее устройство (означаемой буквой «дельта») и интегратор или сумматор (означающий буквой «сигма»).

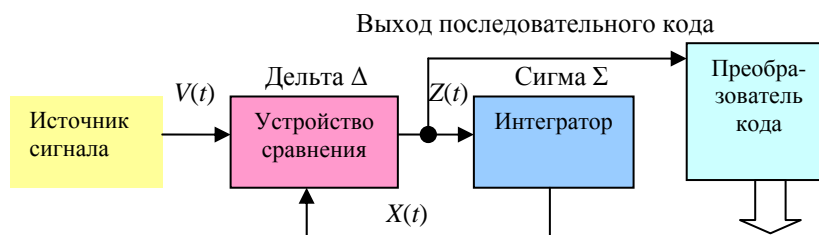


Рис. 1. Упрощенная структура АЦП с сигма-дельта модуляцией

Устройство работает следующим образом. Источник сигнала формирует сигнал $V(t)$. Этот сигнал поступает на устройство сравнения, которое из этого сигнала вычитает от интегратора $X(t)$. Чаще всего устройство сравнения – это простой компаратор, на выходе которого формируются лишь два уровня сигнала, в данном случае – положительный или отрицательный сигнал фиксированной величины (одной и той же). Интегратор осуществляет интегрирование этой импульсной последовательности, формируя сигнал $X(t)$ для обратной связи, подаваемой на устройство сравнения. За счет действия обратной связи выходной сигнал интегратора $X(t)$ в среднем с высочайшей точностью равен входному сигналу АЦП, то есть сигналу $V(t)$. Поскольку выходной сигнал $X(t)$ является интегралом от импульсного сигнала $Z(t)$, получается вследствие работы системы, что формируемая импульсная последовательность $Z(t)$ несет информацию о величине аналогового сигнала $V(t)$. Далее, как правило, в АЦП содержится преобразователь кода, который преобразует последовательность нулей и единиц в параллельный код, соответствующий значению преобразованного сигнала.

2. ВАРИАНТЫ СТРУКТУРНЫХ СХЕМ АЦП С КОММУТАЦИЕЙ

2.1. Схема с одним УВХ

Один из вариантов схемы АЦП с коммутацией показан на *Рис. 2*. Это устройство работает следующим образом. Формирователь импульсов коммутации формирует импульсы, которые управляют ключом и мультиплексором. Как правило, для преобразования каждого сигнала выделяется одинаковое время. Если преобразуются два сигнала, то устройство

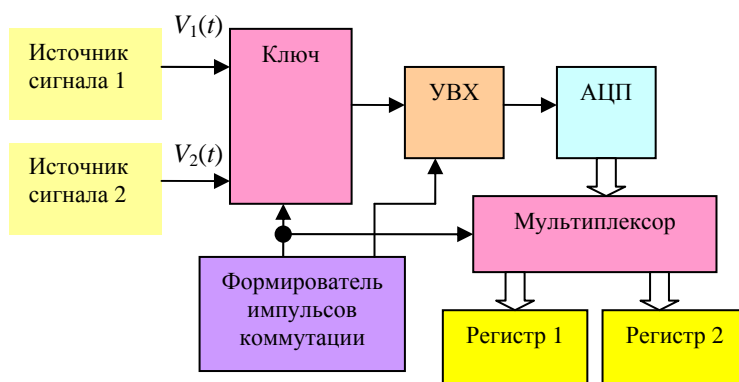


Рис. 2. Упрощенная схема многоканального АЦП с коммутацией с единственным УВХ (на примере двух каналов)

Действительно, в этом случае одно и то же УВХ используется для хранения значений каждого из преобразуемых сигналов. Эти значения могут существенно отличаться друг от друга, поэтому УВХ каждый раз при подключении входит в режим перезаряда запоминающего конденсатора в большом (и

получается двухканальным. В этом случае, например, выходной сигнал формирователя замыкает первый канал в ключе и в мультиплексоре при низком уровне своего выходного сигнала и замыкает второй канал в ключе и мультиплексоре при высоком уровне этого выходного сигнала. Например, в исходном состоянии выходной сигнал формирователя низкий. Сигнал от первого источника сигнала поступает через ключ на УВХ, далее на АЦП и преобразуется в цифровой код. Этот цифровой код через мультиплексор поступает в первый регистр. По окончании времени, отпущенного на преобразование, выходной сигнал формирователя становится сигналом высокого уровня, ключ и мультиплексор замыкают свои вторые каналы. Поэтому на АЦП через ключ и УВХ поступает сигнал от второго источника сигнала, а результат преобразования поступает на второй регистр через мультиплексор. Для успешной работы УВХ необходимы также импульсы, управляющие его режимами, которые также может формировать формирователь импульсов.

Эта схема интуитивно понятна и видится достаточно лаконичной, поэтому она достаточно распространена. Действительно, многие разработчики считают, что УВХ необходима именно для успешной работы АЦП, то есть для того, чтобы входной сигнал АЦП не изменялся за время его преобразования. Это ошибочное представление уходит корнями к технике АЦП поразрядного уравнивания, которые работают по алгоритму, подобному алгоритму взвешивания с помощью гирь. И хотя успешная работа АЦП поразрядного уравнивания действительно требует, чтобы входной сигнал не изменялся, ошибочно решать эту задачу с помощью УВХ на выходе ключа.

непредсказуемом) интервале напряжений. Скорость этого процесса обратно пропорциональна оставшейся разнице между входным и выходным напряжением УВХ, то есть заряд происходит по экспоненциальному закону. Если, например, за время τ_0 конденсатор зарядится до половины требуемого значения, то

за последующие такой же интервал τ_0 он зарядится лишь на оставшуюся половину половины, то есть на четверть. Иными словами, после $t = \tau_0$ остаток (ошибка) будет равен половине значения, после $t = 2\tau_0$ остаток будет равен четверти, и так далее. Для двадцатиразрядного АЦП для завершения переходного процесса с погрешностью не более единицы младшего разряда длительность заряда УВХ должна составлять $t = 20\tau_0$. Таким образом, в схеме по *Рис. 2* небольшая экономия (один УВХ вместо двух) приводит к необходимости большой потери времени, либо, если время заряда УВХ выбрано недостаточным, это приведет к большому росту погрешности.

2.2. Схема с несколькими УВХ

Также схема может иметь два УВХ между источниками сигнала и ключом, как показано на *Рис. 3*. В этой схеме каждый УВХ сохраняет только соответствующие отсчеты одного и того же сигнала. Предположительно, выбор частоты дискретизации осуществлен обоснованно, то есть за время между последующими тактами преобразования сигнал изменяется незначительно. Поэтому переходный процесс в УВХ соответствует малому значению приращения. Следовательно, он намного раньше достигнет малой величины остаточной ошибки. Поэтому такую схему следует предпочесть по сравнению со схемой по *Рис. 2*.

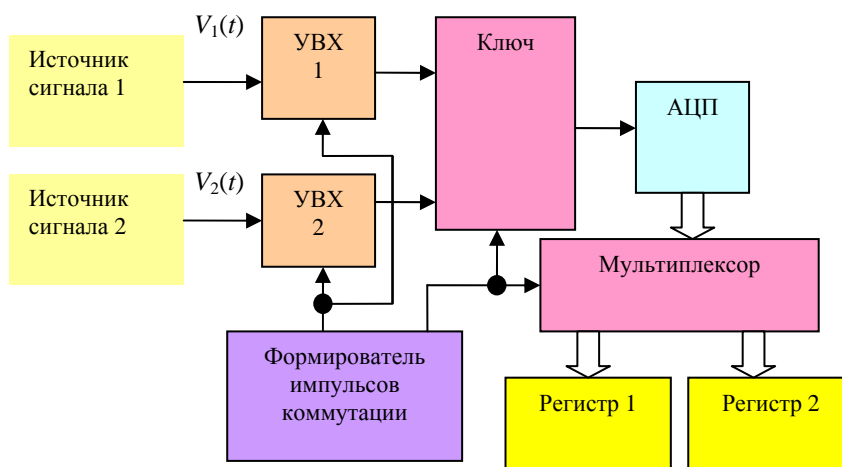


Рис. 3. Упрощенная схема многоканального АЦП с коммутацией со многими УВХ (на примере двух каналов)

2.3. Схема без УВХ

Также при некоторых видах АЦП схема может вовсе не иметь УВХ, как показано на *Рис. 4*. К таким АЦП относятся АЦП с двойным интегрированием, АЦП с сигма-дельта модуляцией и некоторые другие. Принцип действия таких АЦП не исключает того, что преобразуемый сигнал изменяется во время его преобразования, поскольку преобразуется в итоге среднее значение сигнала за время его преобразования. Такие АЦП не требуют высокочастотной фильтрации входного сигнала и не требуют использования УВХ. Применение УВХ на входе таких АЦП не только не требуется, но и противопоказано, поскольку, если за счет фильтра высокочастотные компоненты сигнала устранены не полностью, то в момент перехода УВХ в режим хранения импульс помехи может

существенно исказить величину сигнала, который требуется преобразовать. Поэтому устройство, показанное на *Рис. 4*, работает следующим образом. Импульс с выхода формирователя последовательно принимает значение высокого и низкого уровня. При одном значении этого сигнала ключ и мультиплексор открывают свои первые каналы. Поэтому АЦП подключается к первому источнику сигнала, преобразует его, а результат через мультиплексор поступает в первый регистр. При другом значении управляющего сигнала ключ и мультиплексор открывают свои вторые каналы, поэтому АЦП подключается к источнику второго сигнала, преобразует его и результат через мультиплексор передают во второй регистр. Далее цикл повторяется.

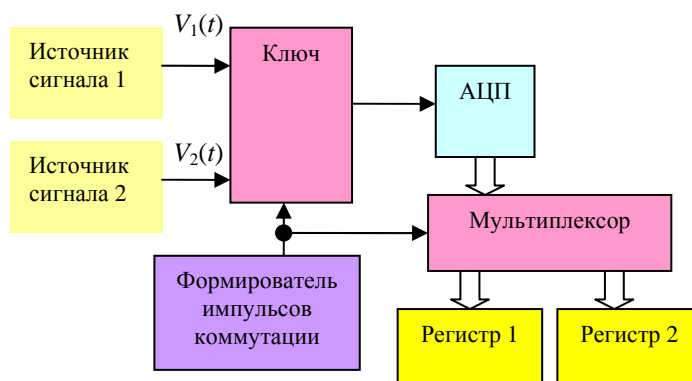


Рис. 4. Упрощенная схема многоканального АЦП с коммутацией без УВХ (на примере двух каналов)

2.4. Многоканальная схема без коммутации

Нами предлагается для анализа сравнить схему многоканального АЦП без коммутации, как показано на Рис. 5. Как видим, если считать, что сам АЦП намного сложнее любых других элементов, то такая схема может показаться более сложной, чем рассмотренные выше. Но если учесть, что АЦП в наше время – это недорогая и относительно простая микросхема, самодостаточная без каких-либо внешних элементов, видно, насколько эта схема проще. Регистры на выходах АЦП не требуются, так как не требуется направление их выходных потоков отсчетов по двум различным направлениям.

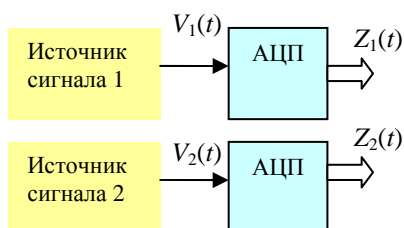


Рис. 5. Схема многоканального АЦП без коммутации

К аргументам в пользу выбора схемы по Рис. 5, основанным на большей простоте, можно добавить и аргументы, связанные с погрешностью преобразования. В отношении АЦП, требующих УВХ на входе, этот аргумент дан выше. При использовании АЦП, не требующих УВХ, аргументы аналогичны, с той разницей, что вместо времени, требуемого на завершение переходного процесса в УВХ, возникает проблема времени на завершение переходного процесса в самом АЦП. Поскольку наиболее убедительный способ доказательства является демонстрация, в следующем разделе осуществлено моделирование работы АЦП в двух режимах: с коммутацией и без коммутации.

3. МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ АЦП

3.1. Моделирование работы АЦП без коммутации

Для моделирования работы АЦП используем структуру в программе VisSim, показанную на Рис. 6. Здесь тестовый сигнал является суммой двух колебания различной частоты, что позволяет более наглядно рассмотреть работу АЦП и промежуточные сигналы. Устройство сравнения реализовано на сумматоре, второй вход которого имеет знак «минус». Для получения двуполярных импульсов на выходе сумматора использован блок «реле». Далее использована метка шины с символом z , что позволяет этот сигнал впоследствии использовать на других участках поля для моделирования. Этот сигнал должен представлять собой импульсы, которые являются результатом преобразования. Сигнал z поступает на вход интегратора, обозначенного символом $1/S$. Далее использован коэффициент усиления, равный десяти, после чего обратная связь замыкается с выхода усилителя на вход сумматора. Также цепочка, состоящая из последовательного соединения метки z , интегратора, усилителя с коэффициентом 10 и метки y , служит для вычисления полученного результата преобразования вне контура АЦП, как это могло бы быть осуществлено в устройстве, анализирующем сигналы, которое не входит в состав АЦП.

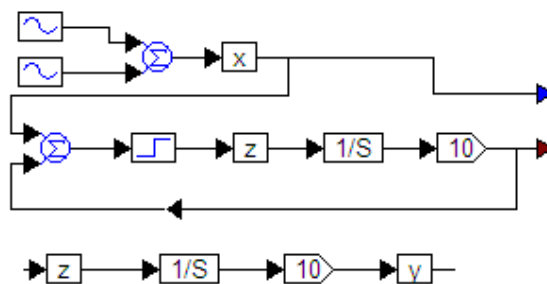


Рис. 6. Модель сигма-дельта АЦП

На Рис. 7 показаны сигналы в структуре по Рис. 6. Красная линия показывает входной сигнал АЦП, а

синяя линия – результат преобразования. Видно, что имеющаяся ошибка достаточно мала, и ее знак изменяется во времени, поэтому средняя ошибка еще меньше. На *Рис. 8* показан выходной сигнал z , представляющий собой последовательность знакопеременных импульсов фиксированной величины. Этот сигнал является результатом преобразования.

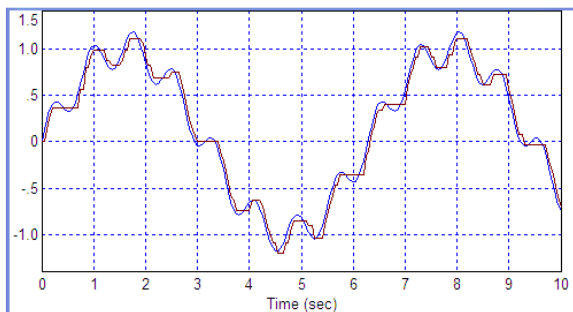


Рис. 7. Процесс на выходе модели АЦП: синяя линия – входной сигнал x , черная линия – аналоговый сигнал u на выходе АЦП

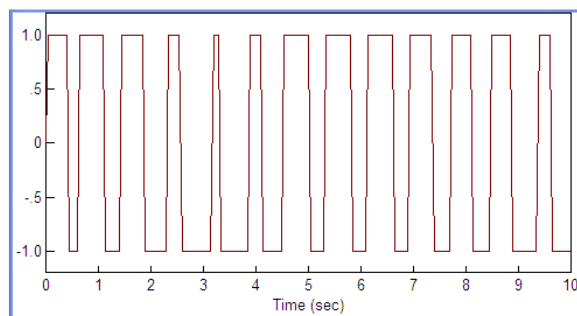


Рис. 8. Выходной импульсный сигнал z в АЦП

Для исследования ошибки преобразования следует вычесть полученный сигнал u из входного сигнала x . Также для определения средней ошибки можно использовать фильтр низких частот, например, как показано в структуре на *Рис. 9*. Там же показан знакопеременный сигнал ошибки АЦП (синяя линия) и средняя величина ошибки (черная линия), которая равна нулю.

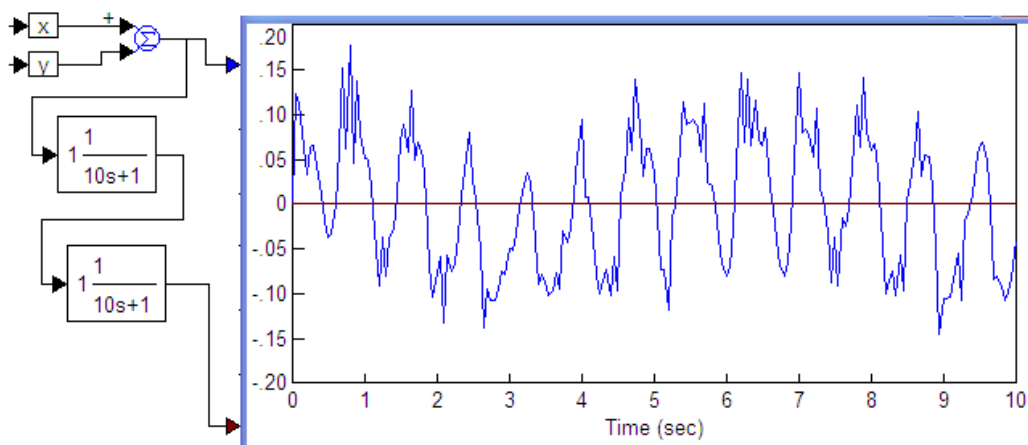


Рис. 9. Модель вычислителя ошибки преобразования АЦП и ее выходные сигналы: синий – до фильтрации, черный – после фильтрации (ошибка после фильтрации, т. е. в среднем равна нулю)

3.2. Моделирование работы АЦП с коммутацией

Исследуем режим с коммутацией АЦП. С этой целью изменим проект, как показано на *Рис. 10*. В структуру введен дополнительный источник сигнала, а также переключатель сигналов, обозначенный блоком **merge**. Переключатель управляется генератором ступенчатого воздействия с задержкой 5 секунд. Поэтому в исходном состоянии на вход АЦП поступает исходный сигнал, а через 5 секунд после этого переключатель срабатывает, и далее на вход АЦП поступает другой сигнал, представляющий собой медленно изменяющийся гармонический сигнал с другой частотой и фазой. На *Рис. 11* показаны сигналы на входе и выходе АЦП в этом режиме. Если бы сигнал, сформированный на выходе переключателя, был бы именно тем сигналом, который следует преобразовать, то выходную последовательность не требовалось бы полностью

преобразовать в единственный поток кодов. Этот поток следовало бы трактовать как последовательность, которая закодировала входной сигнал полностью. Однако, входной сигнал АЦП является результатом преобразования двух разных сигналов, и выходной поток кодов следует разделить на два независимых потока, в соответствии со схемой, показанной на *Рис. 4*. Структура для этих целей показана на *Рис. 12*. В этой структуре вычисляются по отдельности два потока импульсов, а также два отдельных аналоговых сигнала на основе этих двух потоков. Полученные последовательности показаны на *Рис. 13*.

Для того, чтобы оценить ошибку преобразования, целесообразно также получить аналоговые сигналы, которые совпадают с входными во время их преобразования, а на время, когда исходные сигналы отключаются, эти сигналы должны сохранять свое последнее значение. С этой целью воспользуемся УВХ.

Полученные сигналы показаны на *Рис. 14*. Красной линией показан сигнал **z1** первого канала, который через 5 секунд после начала работы сохраняет свое значение на протяжении оставшихся 5 секунд. Черной линией показан сигнал **z2** второго канала, который первые 5 секунд равен нулю, а затем совпадает с входным сигналом.

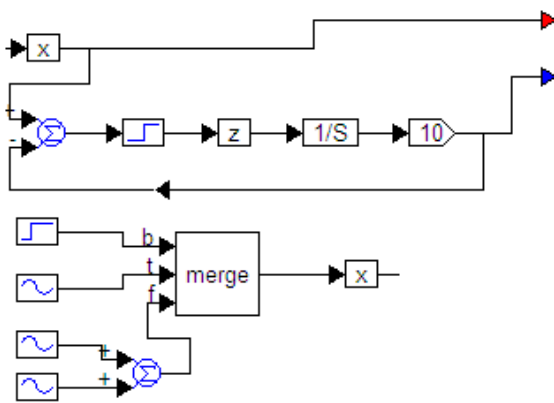


Рис. 10. Структурная схема для исследования режима коммутации в АЦП с сигма-дельта модуляцией

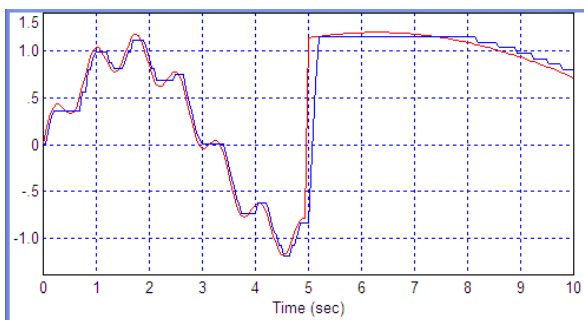


Рис. 11. Сигнал на входе АЦП (красная линия) и результат отслеживания его следящей системой в составе АЦП (синяя линия)

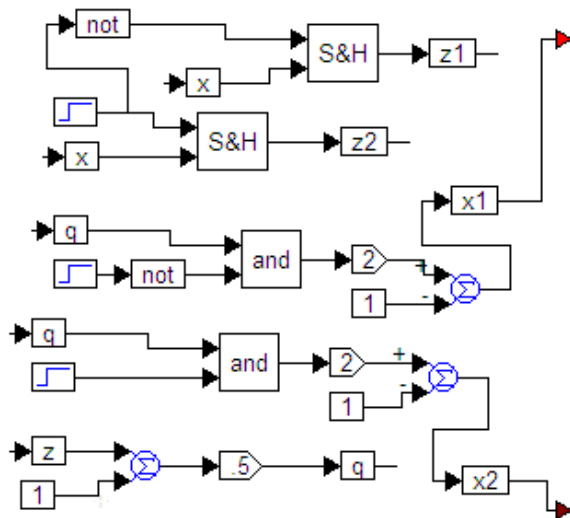


Рис. 12. Структурная схема для вычисления промежуточных сигналов.

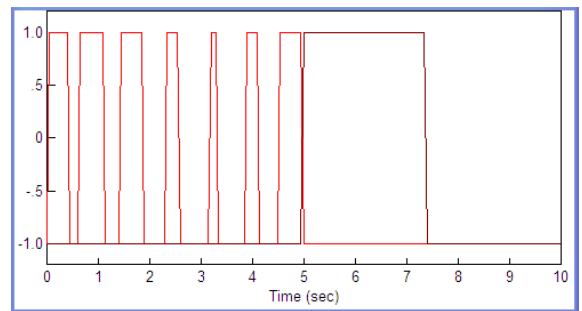


Рис. 13. Сигналы **z1** (красный) **z2** (черный) – результат работы АЦП с коммутацией

На *Рис. 15* показана структура для раздельного восстановления исходных сигналов из отдельных полученных последовательностей. Результат восстановления показан на *Рис. 16*.

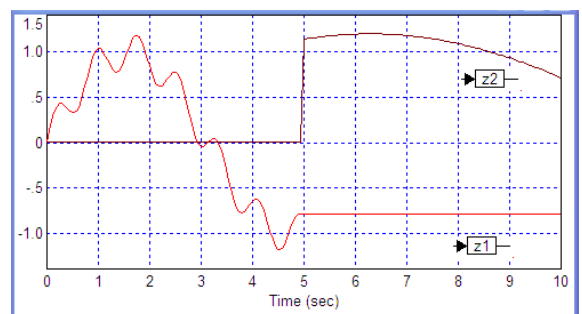


Рис. 14. Два различных аналоговых сигнала с устройством выборки-хранения, которые поступают на различные входы коммутаторов

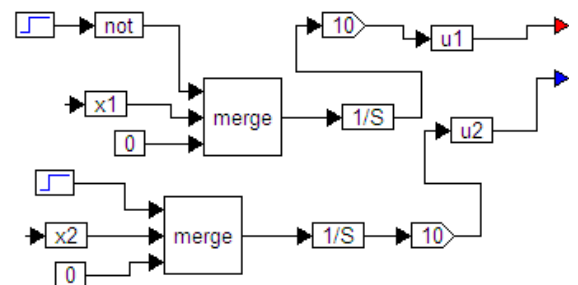


Рис. 15. Структурная схема для вычисления фактически измеренных сигналов с помощью АЦП

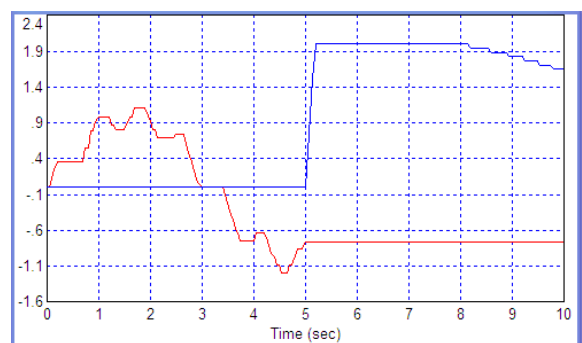


Рис. 16. Восстановленные сигналы на выходах АЦП (дискретные последовательности импульсов преобразованы в аналоговые сигналы)

Структура для вычисления ошибки восстановления показана на *Рис. 17*, а восстановленная ошибка преобразования показана на *Рис. 18* (ошибка первого канала) и на *Рис. 19* (ошибка второго канала).

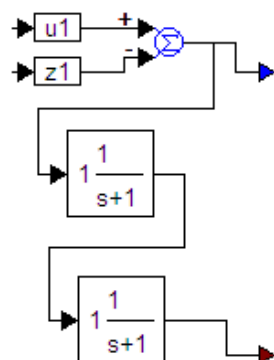


Рис. 17. Структура для вычисления ошибки АЦП, а также фильтр второго порядка

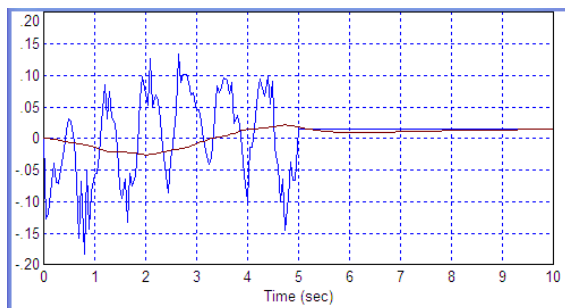


Рис. 18. Ошибка первого канала (достаточно мала)

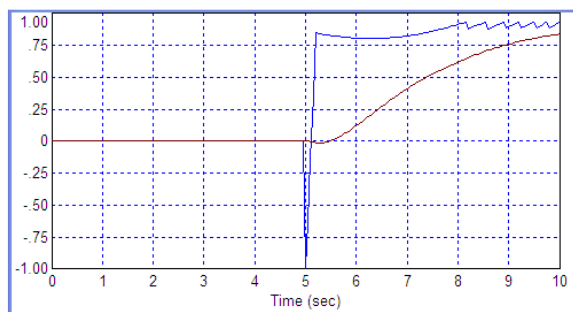


Рис. 19. Ошибка второго канала (слишком велика)

Моделирование за более длительный интервал времени показало, что указанный скачок ошибки не исчезает. Также в одном из модельных экспериментов сигналы были специально видоизменены таким образом, чтобы в момент переключения значения этих сигналов мало отличались, то есть в этот момент сигналы первого и второго каналов совпадают.

Даже в этом случае при переключении канала возникал скачок ошибки на величину 0,8 единиц. Это составляет около 50% амплитуды входного сигнала или 25% его размаха. Соответствующие графики показаны на *Рис. 21–23*.

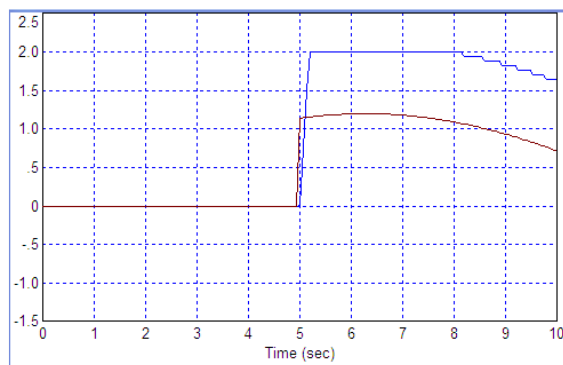


Рис. 20. Сравнение фактического сигнала второго канала (черная линия) с восстановленным сигналом (синяя линия)

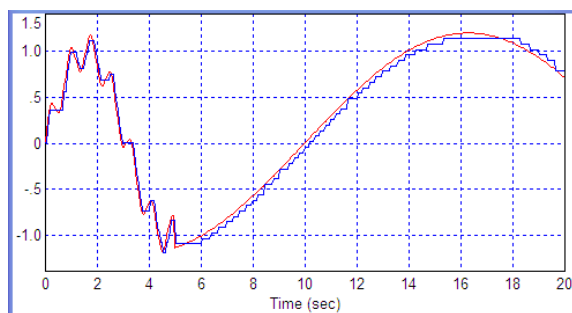


Рис. 21. Результат эксперимента, когда новое значение сигнала второго канала мало отличается от предыдущего значения первого канала (красная линия – входной сигнал, синяя линия – результат преобразования)

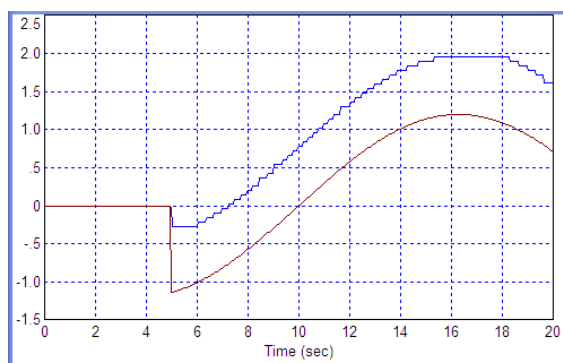


Рис. 22. Результат преобразования в другом режиме АЦП: синяя линия – результат преобразования, черная линия – фактический сигнал второго канала

Так на *Рис. 21* показан входной сигнал (красная линия) и результат преобразования в том случае, когда разница между входными сигналами первого и второго каналов в момент переключения каналов невелика. На *Рис. 22* показан результат преобразования, полученный путем обработки кодов, получаемых при работе второго канала. На *Рис. 23* показан вид ошибки преобразования. Результат преобразования содержит ошибку, возникающую в момент переключения каналов. Отдельно вид ошибки второго канала показан на *Рис. 23*.

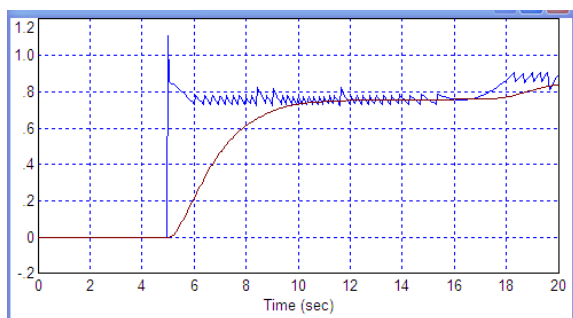


Рис. 23. Ошибка второго канала в новом режиме

3.3. Ненадежный способ уменьшения ошибки преобразования при использовании схемы с коммутацией

Эффективный, но недостаточно надежный способ уменьшения ошибки преобразования второго канала найден эмпирически. Он состоит в том, что устройство восстановления второго канала включается на 0,08 секунд раньше, чем требуется. Соответствующие графики показаны на Рис. 24.

Этот вариант ненадежен, поскольку при изменении фазы второго сигнала или времени упреждения ошибка второго канала вновь становится существенной. Этот эксперимент лишь показывает, что средняя величина результата преобразования существенно зависит от того, какая часть предыдущего кода, полученного при предшествующем преобразовании, используется при восстановлении сигнала, преобразуемого в последующем интервале времени.

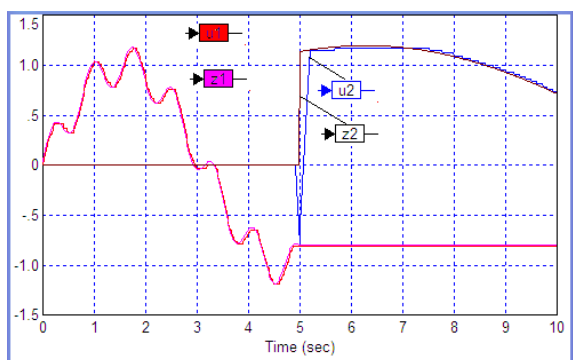


Рис. 24. Отдельно входные сигналы двух каналов и результат их преобразования: u_1 – входной сигнал первого канала, u_2 – входной сигнал второго канала, z_1 – результат преобразования по первому каналу, z_2 – результат преобразования по второму каналу

4. ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Исследования показали, что использование одного АЦП в режиме коммутации крайне нежелательно. Вследствие переключения следящей системы, имеющейся в составе АЦП, возникает переходный процесс, который порождает динамическую ошибку. Если весь

результат преобразования входного сигнала в виде получаемой последовательности дискретных импульсов полностью используется для восстановления входного сигнала, то среднее значение входного сигнала не искажается за счет динамической ошибки. Поэтому преобразование без коммутаций даже сигнала с существенными скачками дает достаточно точный результат по среднему значению. Иными словами, в режиме без коммутации динамическая ошибка относительно мала и не порождает статической ошибки.

Если же осуществлять разделение входных сигналов и выходных последовательностей по нескольким каналам, то возникает неконтролируемая статическая ошибка после каждого переключения.

Можно предложить следующий алгоритм действия.

1. Даже если применяется коммутация АЦП, получаемый поток цифровых отсчетов не следует разделять на два потока, а преобразовать в параллельный код целиком.

2. После преобразования последовательного кода в параллельный код следует использовать те отсчеты, которые полностью относятся к первому каналу или полностью относятся ко второму каналу.

3. Отсчеты, получаемые в момент переключения каналов, ненадежны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Все же схема по структуре Рис. 5 остается предпочтительной для задач точного преобразования (измерения) аналоговых сигналов. Данная статья подтвердила это экспериментально.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, проект 2014/138, название проекта: “Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / Новосибир. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [2] 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.
- [3] В.А. Жмудь. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim.: учеб. пособие / В. А. Жмудь ; Новосибир. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 124 с.
- [4] В.А. Жмудь. Измерительные устройства автоматики.: учеб. пособие / В. А. Жмудь ; Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2012. – 72 с.

On the Application of ADC Sigma-Delta Modulation in Switching Mode

V.A. ZHMUD

Abstract. Analog-to-digital converters (ADC) in switching mode are traditionally used in various electronic circuits for converting digital signals from several sources by means of the single ADC. Traditionally, such a decision was considered appropriate because it seemingly allows significant simplification of the hardware. Theoretical foundation should be pointed to abandon this decision, because the hardware saving is negligible but the loss of measurement accuracy by switching mode for each channel is very palpable. This opinion is not shared by all, because even the developers of ADCs provide switching mode, putting it in the schematic execution of the ADC, as well as recommending it to the user guides. This paper carried out a comparative study of the ADC mode switching without switching by VisSim simulation program. The principle of operation of ADC with sigma-delta modulation is used for simulation, because such kind of ADC are becoming more widespread due to their low cost and high accuracy with good speed, which is sufficient for many practical cases. The simulation results substantiate the feasibility of non-switched decisions.

Keywords: ADC, switching, precision, accuracy, multi-channel converters, modeling

REFERENCES

- [1] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 c.
- [2] Zhmud' V.A. Dinamika mehatronnyh sistem: ucheb. posobie / V.A. Zhmud', G.A. Francuzova, A.S. Vostrikov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. – 176 s. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [3] V.A. Zhmud'. Modelirovanie i chislennaja optimizacija zamknutyh sistem avtomaticheskogo upravlenija v programme VisSim.: ucheb. posobie / V. A. Zhmud' ; Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2012. – 124 c.
- [4] V.A. Zhmud'. Izmeritel'nye ustrojstva avtomatiki.: ucheb. posobie / V. A. Zhmud' ; Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk : Izd-vo NGTU, 2012. – 72 c.



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oa0_nips@bk.ru

Рекомендации по быстрой разработке макетов цифровых систем управления на базе микроконтроллеров

Вадим Жмудь, Андрей Ивойлов, Виталий Трубин
ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск

Аннотация: Статья продолжает серию публикаций о разработке микропроцессорной техники для цифровых систем управления. Статья может быть использована для подготовки студентов, инженеров и аспирантов к реальной научно-исследовательской деятельности.

Ключевые слова: Микропроцессорная техника, цифровые управляющие системы

ВВЕДЕНИЕ

При разработке цифровых систем управления одним из первых этапов является создание макетного образца. Основная задача макетного образца - проверка правильности работы изделия в функциональном аспекте. При этом, как правило, габаритные, температурные, вибрационные требования упрощают, либо игнорируют вообще. Это позволяет уже на первых этапах определить проблемные места при проектировании, и, при необходимости, провести дополнительные исследования и испытания с последующим созданием второго, третьего и т.д. макетов. Благодаря данному подходу удаётся, как правило, замечать ошибки на более ранних этапах проектирования, и принимать соответствующие корректирующие действия. А как известно, стоимость исправления ошибок растёт в геометрической прогрессии от этапа к этапу. Поэтому чем раньше ошибки будут обнаружены и исправлены, тем лучше.

В настоящее время ценность инженера в большей степени определяется способностью найти уже готовые решения. Бесценным инструментом в этой работе является поиск в Internet готовых "кубиков", из которых можно будет собрать макет системы управления с заданными основными характеристиками, и сделать это надо, как показывает практика, в кратчайшие сроки. Настоящий материал носит рекомендательный характер и предназначен облегчить выбор "кубиков" для построения макета системы управления.

ОТЛАДОЧНАЯ ПЛАТА

"Сердцем" цифровой системы управления, как правило, является отладочная плата. Многие производители кроме выпуска микроконтроллеров (МК) так же выпускают ещё и отладочные платы на их базе. На момент

написания данного материала для решения многих задач инженерам можно порекомендовать использовать 32-х разрядные МК на базе ядра ARM Cortex-M3, например, STM32F103C8T6 [1] (Рис. 1). Его основные характеристики:

- Максимальная частота 72 МГц;
- Flash-память 64 Кбайт;
- RAM-память 20 Кбайт;
- АЦП 2 × 12 бит (до 16 каналов);
- Скорость АЦП - 1 МГц;
- сторожевой таймер - 1;
- Часы реального времени - 1;
- Количество интерфейсов USART - 3;
- Количество интерфейсов SPI - 2;
- Количество интерфейсов I²C - 3;
- Количество интерфейсов CAN - 1;
- Количество интерфейсов USB - 1;
- Семиканальный контроллер прямого доступа к памяти DMA;
- Многофункциональные таймеры - 7;
- Напряжение питания ядра: 2..3,6 В;
- Напряжение питания периферии: 2..3,6 В;
- Рабочая температура от -40..+85 °С.

Одной из интересных подсистем микроконтроллера является контроллер прямого доступа к памяти [2]. Благодаря этому, можно, например, заставить АЦП оцифровывать данные и помещать полученный результат в ячейки памяти ОЗУ без участия центрального процессора. Для программиста работа с оцифрованными данными сводится только к чтению заданной ячейки ОЗУ в любое время, и без проверки различных флагов и статусов, т.е. работа как с обычной ячейкой памяти, в которой "кто-то" регулярно обновляет данные. На текущий момент времени купить данный МК можно по цене около 1,5 \$ при покупке партии 500 шт. [3]. Учитывая функциональные возможности данного МК и низкую стоимость, можно сказать, что для большинства проектов становится не целесообразно использовать 8-ми и 16-ти разрядные МК. Так же не маловажным является то, что данный МК 32-х разрядный. Достаточно сложно реализовывать регуляторы на 8-ми и 16-ти разрядных МК. Приходится объединять байты в 24-х и 32-х битные слова, что приводит к увеличению объёма и времени выполнения программы. Наличие ОЗУ в 20 Кбайт позволяет оперативно сохранять

промежуточные переменные или результаты оцифровки аналоговых сигналов, а потом, например, передать их по RS-232 в компьютер для дальнейшей обработки. Обратите внимание, что аналоговый сигнал на входе МК не должен быть ниже нуля вольт, и не выше напряжения питания. При необходимости оцифровывать двухполярный сигнал используйте схему сдвига уровня с необходимым коэффициентом масштабирования.



Рис. 1

Для работы с STM32F103C8T6 можно приобрести, например, отладочную плату, показанную на Рис. 2. Её стоимость колеблется от 2,5 до 5 \$. Для работы требуется внешний программатор. Разъём USB используется только для подачи питания +5 В.

Так же неплохим вариантом может быть МК из серии STM32F100. Например, в отладочной плате STM32VLDISCOVERY (Рис. 3) стоит МК STM32F100RBT6B. Стоимость отладочной платы на его базе около 15 \$ [4]. Подключается эта плата так же к USB. Функционально она разделена на две части. Часть, которая ближе к разъёму USB - это "программатор/отладчик". Вторая часть - собственно STM32F100RBT6B с минимальными цепями обвязки. Почти все контакты МК выведены на штыревые линейки, которые расположены по периметру платы. Это

позволяет подключать к МК дополнительные модули и платы с минимальными затратами. На плате есть два программно управляемых светодиода (зелёный и синий), кнопка "RESET", а так же кнопка "USER", состояние которой можно опрашивать программно. Так же можно отметить то, что часть "программатор/отладчик" можно использовать для программирования и отладки внешнего по отношению к данной плате микроконтроллера по 3-м проводам (SWD). Более подробную информацию по этой плате можно найти в [5] и [6]. Из сред программирования можно рекомендовать Keil MDK-ARM (ARM C/C++ Compiler), CoCoX CoIDE (GCC Compiler), IAR Embedded Workbench for ARM (IAR C/C++ Compiler) или визуальный графический редактор STM32CubeMX и среда разработки System Workbench for STM32 (краткое обозначение – SW4STM32) [7].

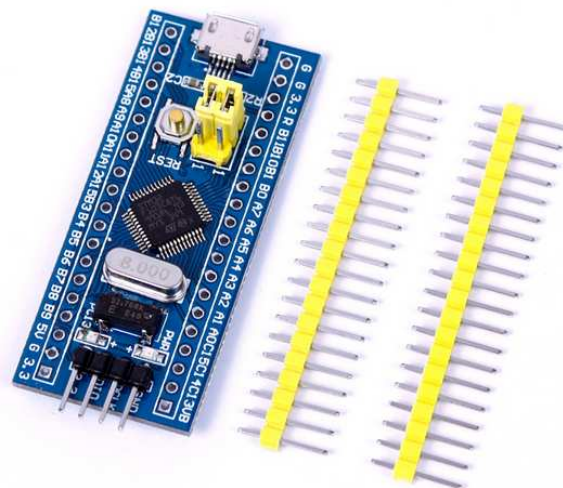


Рис. 2



Рис. 3

МОДУЛЬ СВЯЗИ С КОМПЬЮТЕРОМ

При разработке макета практически сразу возникает задача визуализации и анализа данных.

Это могут быть данные с датчиков или внутренние переменные состояния. До сих пор популярным решением для этих целей остаётся последовательный интерфейс RS-232 [8]. Не

смотря на его почтенный возраст (стандарт был введён в 1962 году) почти все МК разных фирм поддерживают его. Одна из причин его популярности - простота. Для связи МК с компьютером можно рекомендовать преобразователь *USB-RS232*, как, например, показанный на *Рис. 4*. Стоимость данного варианта от 1 до 2 \$. Более подробно на эту тему можно прочитать в [9].



Рис. 4

Для организации связи достаточно три провода: *TxD* (передача), *RxD* (приём) и *GND* (земля). Приведённый выше вариант не обеспечивает гальванической развязки сигналов. Т.е. *GND* компьютера будет гальванически связана с *GND* МК. На это следует обращать внимание, когда, например, планируется работать с высоковольтными сигналами, длинными линиями от датчиков и т.п. Так же следует обратить внимание на то, что скорость обмена через данное устройство ограничено цифрой около 10 *КБайт/сек*. Длина линии связи по *RS-232* может быть от нескольких сантиметров до 15 м. Причём, чем выше скорость, тем меньше должна быть скорость связи.

БЕСПРОВОДНОЙ УДЛИНИТЕЛЬ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО ПОРТА НА БАЗЕ РАДИОКАНАЛА BLUETOOTH

Иногда нет возможности или затруднительно связать макет проводами с компьютером, например, из-за движения, вращения макета и т.п. В таком случае требуется обеспечить беспроводной обмен данными между компьютером и разрабатываемым устройством. Для этих целей можно использовать, например, модули приёма/передачи данных *Bluetooth HC03-HC06* (*Рис. 5*). Как видно из рисунка внешняя антенна не требуется. С стороны компьютера можно использовать любой адаптер *USB-Bluetooth*, который используется, например, для связи с беспроводной мышкой. На компьютере для программиста будут видны два виртуальных *COM*-портов, один на передачу, второй - на приём информации. С точки зрения программиста на МК никаких сложностей так же нет. Обмен данными будет идти, как будто, вы работаете с обычным проводным *USART*. Более подробно на данную тему можно прочитать в [10].

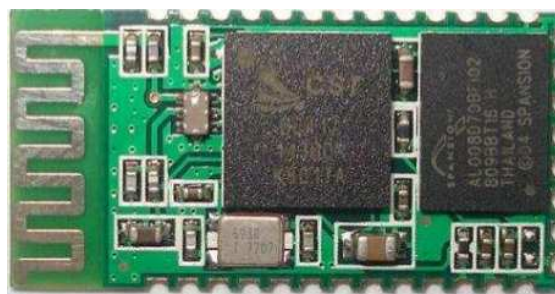


Рис. 5

ЛОКАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА ОТОБРАЖЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ

Довольно часто желательно иметь на разрабатываемом изделии небольшое устройство отображения. В качестве первого варианта можно рассмотреть ЖКИ индикатор от сотового телефона *NOKIA 5110* (*Рис. 6*). Не смотря на то, что сам телефон давно не выпускают, его дисплей, благодаря простоте подключения к нему, приобрёл широкую популярность. Индикатор графический 84 x 84 точки, монохромный. Встроенного знакогенератора нет. Напряжение питания 2,7 - 3,3 В. Внутри встроен управляющий контроллер *PCD8544*. Подключается по последовательному интерфейсу *SPI*. Для подключения достаточно 7 проводов, включая питание и землю. Стоимость такого модуля от 2 до 4 \$. Более подробную информацию можно получить в [11].

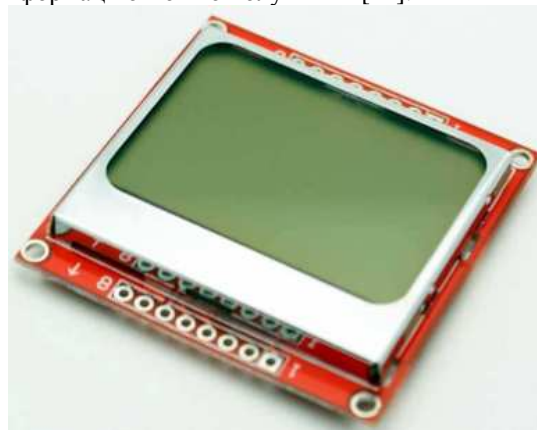


Рис. 6

Так же интересным вариантом может быть *OLED* индикатор. Например, *UG-2864ASGG14* (*Рис. 7*). Это графический индикатор, 128 x 64 точки, монохромный (белый или синий). Несомненным достоинством такого индикатора является то, что в нём светится каждая точка. Т. е. каждая точка - отдельный светодиод. Благодаря этому индикаторы такого типа видны в любое время суток, под любым углом зрения. Внутри индикатора находится управляющий контроллер *SH1106*. Для подключения индикатора достаточно пяти проводов, включая питание и землю. Связь осуществляется по последовательному интерфейсу *I²C*. Питание модуля осуществляется

от источника напряжения от +3 до +5 В. Из недостатков можно отметить относительно высокую стоимость - от 6 до 10 \$, маленький размер рабочей области экрана - 1,3 дюйма по диагонали (1 дюйм = 25,4 мм). Более подробно об этом изделии можно прочитать в [12]. При приобретении подобной продукции обратите внимание на тип встроенного управляющего контроллера. Без знания этой информации достаточно сложно произвести первоначальную инициализацию индикатора после включения питания, что может привести к его некорректной работе. Существуют версии с подключением по SPI интерфейсу.

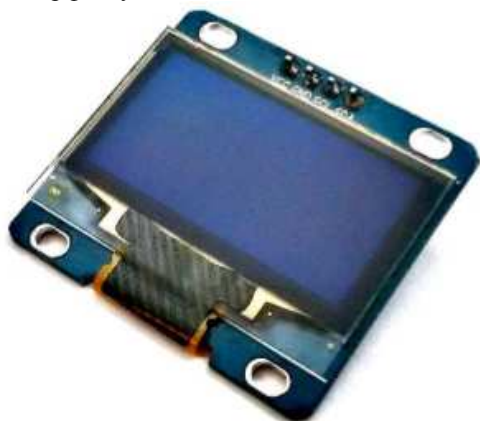


Рис. 7

Если не требуется большого разнообразия в выводимой информации, и достаточно выводить только численные значения, то хорошим вариантом может быть модуль на базе микросхемы MAX7219. Эта микросхема способна управлять до 8-ми семисегментными индикаторами или матрицей светодиодов 8 x 8. Внешний вид модуля на MAX7219 приведён на Рис. 8.

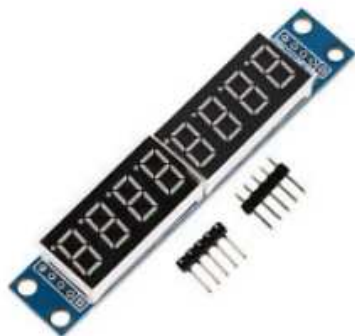


Рис. 8

Отличительной особенностью данного варианта является стабильная работа при минусовых температурах, повышенная стойкость к механическим воздействиям - ударам, броскам. Питание модуля осуществляется от +5 В. Интерфейс связи - SPI. Возможно подключение модуля к МК с +3,3 В логическими сигналами. Для этого необходимо настроить выходные порты MOSI, CLK у STM32 как выходы с открытым стоком и поставить подтягивающие резисторы на +5 В. Для подключения модуля достаточно пяти

проводов, включая питание и землю. Стоимость такого модуля от 2 до 4 \$. Более подробную информацию можно получить в [13]. Имеется возможность программного изменения яркости. Необходимо отметить достаточно высокую яркость, равномерность и "сочность" светящихся сегментов семисегментного светодиодного индикатора.

УСТРОЙСТВА ВВОДА ИНФОРМАЦИИ

Кроме применения привычных кнопочных клавиатур можно выделить постепенно нарастающий интерес к сенсорным кнопкам. Сама идея не нова. Поскольку любое проводящее тело, в том числе и человек, обладает ёмкостью, величина которой зависит от геометрии тела и окружающего его диэлектрика, прикосновение пальца к контактной сенсорной площадке равносильно подключению параллельно к выводу дополнительного конденсатора ёмкостью около 100 пФ. Для работы с сенсорными кнопками, ввиду малой ёмкости человеческого тела и постоянно изменяющейся внешней обстановки, лучше использовать специализированные микросхемы, например, из серии TTP-22x (Рис. 9).

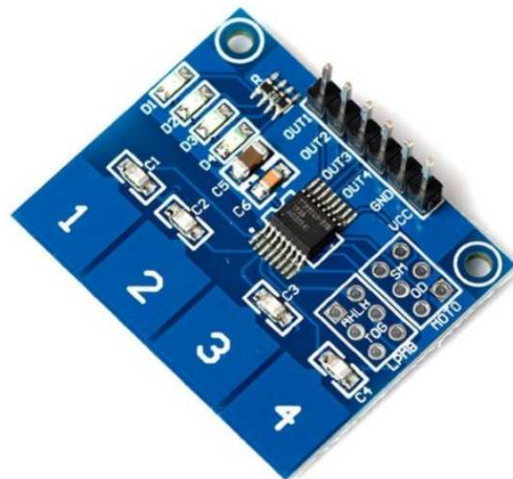


Рис. 9

Они предназначены для работы с разным количеством сенсорных кнопок, например, к TTP-224 можно подключить до четырех сенсорных площадок. Микросхемы имеют очень низкий собственный ток потребления - около 10 мкА, что позволяет не отключать от них питание при работе от автономных источников энергии. По типу выходных сигналов микросхемы так же дают большой выбор различных вариантов. Можно настроить режимы: обычный логический выход, выход с открытым стоком с "притягиванием к плюсу", выход с открытым стоком с "притягиванием к земле". Можно выбрать режим "кнопка" или режим "переключатель". Так же можно настроить допускается или нет одновременное нажатие кнопок. Все эти режимы можно настроить с помощью логических уровней на управляющих

входах микросхемы. Широкий диапазон напряжения питания от +2,4 В до +5 В, работа от -40 °С так же позволяют расширить сферы применения этих микросхем. Интересной особенностью является возможность микросхемы подстраиваться под "паразитную" ёмкость. Если, например, на сенсорную кнопку попала соринка, то через 20 сек. микросхема подстроится под эту особенность, и можно будет дальше нормально работать. Стоимость платы, приведённой на Рис. 9 колеблется от 1 до 2 \$. Более подробное описание можно найти в [14].

Ещё одним интересным устройством ввода информации является джойстик, который применяется в игровой индустрии (Рис. 10).



Рис. 10

С электрической точки зрения устройство представляет собой два переменных резистора 10 кОм и одну кнопку. Все контакты указанных элементов выведены на разъём и могут использоваться в произвольном порядке.

Несмотря на то, что на одном из выводов разъёма написано "+5 В", к нему можно подключать любое напряжение, т.к. на плате стоят просто переменные резисторы и кнопка. Ввиду широкой распространённости стоимость данного модуля колеблется от 1 до 2 \$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

К сожалению, в рамках одной статьи сложно рассказать о многих интересных "кубиках", которые доступны для разработчика в настоящее время. Поэтому дальше ограничимся кратким перечислением.

Многие производители полупроводников из Китая, помимо копирования микросхем зарубежных ведущих производителей полупроводников, начали разрабатывать и выпускать собственные чипы. Например, у фирмы *Nanjing QinHeng Electronics* есть много интересных микросхем из серии CH34x (CH340, CH376 и т.д.). К сожалению, документацию на английском уже можно часто и не найти. Для тех, кто ещё не выучил китайский язык можно рекомендовать переводчик Google, который хоть и не идеально переводит текст, но позволяет многое понять в исходном тексте на китайском языке. Так же можно обратить внимание на такую интересную особенность. При просмотре сайта на китайском языке при наведении курсора на определённый пункт на странице в нижней части браузера отображается название страницы на английском языке (Рис. 11) куда будет произведена отсылка. Это позволяет быстрее находить нужную информацию.



Рис. 11

Для измерения температуры можно рекомендовать микросхемы с цифровым выходом, например, DS18S20. Если не хватает внутреннего ОЗУ, то можно использовать микросхему 23LC1024 на 1 Мбайт, обмен с которой осуществляется по последовательному интерфейсу SPI. Для её подключения потребуется всего 6 проводов, включая питание и землю. Интересной микросхемой, содержащей внутри акселерометр и гироскоп, является MPU6050 [15]. Так же можно обратить внимание на модуль

воспроизведения звуковых сигналов JQ6500 [16]. Он предназначен для автономного воспроизведения mp3 файлов, которые записаны в память модуля, по внешним управляющим сигналам или по командам, которые передаются по последовательному интерфейсу связи RS-232. Для записи mp3 файлов достаточно подключить модуль к компьютеру по USB. При этом автоматически определится новый диск, на котором необходимо запустить программу, выбрать файлы и дать команду для копирования

mp3 файлов из компьютера в модуль. Т.е. для работы с этим модулем не требуется устанавливать ПО. Так же несомненным достоинством модуля является наличие усилителя на плате. Для нормальной работы достаточно подключить питание +5 В, динамик и можно, коммутируя определённые выходы на землю, воспроизводить различные звуковые файлы.

Обобщая вышеизложенный материал можно рекомендовать разработчикам не пренебрегать поиском готовых решений, которые можно было бы использовать при разработке новых макетов. Эти решения могут существенно сократить срок разработки, уменьшить количество проблемных мест, увеличить надёжность конечного изделия.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] STM32F103C8. Mainstream Performance line, ARM Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes Flash, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN. URL: http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f1-series/stm32f103/stm32f103c8.html
- [2] Википедия. Прямой доступ к памяти. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D1%8F%D0%BC%D0%BE%D0%B9_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF_%D0%BA_%D0%BF%D0%B0%D0%BC%D1%8F%D1%82%D0%B8
- [3] КОМПЭЛ. STM32F103C8T6. Наличие на складах. URL: <http://www.compel.ru/infosheet/ST/STM32F103C8T6/>
- [4] КОМПЭЛ. STM32VLDISCOVERY. Наличие на складах. URL: <http://www.compel.ru/infosheet/ST/STM32VLDISCOVERY/>
- [5] А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. STM32VLDISCOVERY – Средство для быстрой разработки опытных образцов цифровых систем управления. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 3 (5). С. 32-39. См. также URL: http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2013-6_0.pdf
- [6] А.В.Ескин, А.Л.Печников, В.Г. Трубин. Использование платформы STM32VLDISCOVERY для построения простой системы сбора и обработки данных. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 4 (10). С. 66-73. См. также URL: http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-8_0.pdf
- [7] Виктор Чистяков. CubeMX и Workbench: создание проекта на базе STM32 с помощью бесплатного ПО. URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2016/2/8-cubemx-i-workbench-sozdanie-proekta-na-baze-stm32-s-pomoshhyu-besplatnogo-po/>
- [8] Википедия. RS-232. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RS-232>
- [9] В.А.Жмудь, И.В. Трубин, М.В. Трубин. Обмен данными между компьютером и микроконтроллером STM32F100 по последовательному интерфейсу связи RS-232. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 45-51. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-6.pdf>
- [10] А.В.Ескин, В.А.Жмудь, В.Г. Трубин. Беспроводной удлинитель последовательного порта на базе радиоканала BLUETOOTH. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 2 (4). С. 42-47. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2013-05.pdf>
- [11] А.Ю.Ивойлов, А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. Особенности работы с ЖКИ дисплеем NOKIA 5110. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 4 (6). С. 8-13. См. также URL: http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2013-01_1.pdf
- [12] В.А. Жмудь, А.С. Каменская, К.В. Курбетьев, В.Г. Трубин. Графический OLED дисплей UG-2864ASGG14: Первое включение. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 1 (15). С. 29-37. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2016-4.pdf>
- [13] В.А. Жмудь, В.Г. Трубин, А.В. Суменков, М.В. Трубин. Светодиодная индикация на основе микросхемы MAX7219. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 86-96. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2016-11.pdf>
- [14] В.А. Жмудь, И.В. Трубин, М.В. Трубин. Проектирование сенсорных кнопок на базе микросхемы ТТР-224. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 70-74. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-10.pdf>
- [15] Д.С. Федоров, А.Ю. Ивойлов, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин. Использование измерительной системы MPU 6050 для определения угловых скоростей и линейных ускорений. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 1 (11). С. 75-80. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-11.pdf>
- [16] В.Г., Трубин М.В. Трубин. Модуль воспроизведения звуковых сигналов JQ6500-16P. Автоматика и программная инженерия. 2015. № 3 (13). С. 58-63. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2015-6.pdf>
- [17] В.Н. Веприк, В.Г. Трубин. Микроконтроллеры фирмы MOTOROLA (Семейство MC68HC11). Учеб. пособие. М-во образования Рос. Федерации, Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск, 2004.
- [18] Википедия. ARM (архитектура). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_\(%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_(%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0))

Guidelines for the Rapid Development of Microcontrollers Based on the Management of Digital Systems Layouts

V. A. ZHMUD, A. YU. IVOYLOV, V. G. TRUBIN

Abstract: This article continues the series of publications on the development of microprocessor technology for digital control systems. The article can be used for training students, engineers and graduate students to real scientific research.

Key words: Mikroprotsessnaya equipment,

digital control systems

REFERENCES

[1] STM32F103C8. Mainstream Performance line, ARM Cortex-M3 MCU with 64 Kbytes Flash, 72 MHz CPU, motor control, USB and CAN. URL: http://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32f1-series/stm32f103/stm32f103c8.html

[2] Википедия. Прямой доступ к памяти. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D1%8F%D0%BC%D0%BE%D0%B9_%D0%B4%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%83%D0%BF_%D0%BA_%D0%BF%D0%B0%D0%BC%D1%8F%D1%82%D0%B8

[3] КОМПЕЛ. STM32F103C8T6. Наличие на складах. URL: <http://www.compel.ru/infosheet/ST/STM32F103C8T6/>

[4] КОМПЕЛ. STM32VLDISCOVERY. Наличие на складах. URL: <http://www.compel.ru/infosheet/ST/STM32VLDISCOVERY/>

[5] A.V. Eskin, V.A. Zhmud', V.G. Trubin. STM32VLDISCOVERY – Средство для быстрой разработки опытных образцов цифровых систем управления. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 3 (5). С. 32-39. См. также URL: http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2013-6_0.pdf

[6] A.V.Eskin, A.L.Pechnikov, V.G. Trubin. Ispol'zovanie platformy STM32VLDISCOVERY dla postroeniya prostoy sistemy sbora i obrabotki dannyh. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2014. № 4 (10). С. 66-73. См. также URL: http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2014-8_0.pdf

[7] Виктор Чистяков. CubeMX и Workbench: создание проекта на базе STM32 с помощью бесплатного ПО. URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2016/2/8-cubemx-i-workbench-sozdanie-proekta-na-baze-stm32-s-pomoshhyu-besplatnogo-po/>

[8] Википедия. RS-232. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/RS-232>

[9] V.A.Zhmud', I.V. Trubin, M.V. Trubin. Obmen dannymi mezhdju komp'yuterom i mikrokontrollerom STM32F100 po posledovatel'nomu interfejsu svyazi RS-232. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2015. № 1 (11). С. 45-51. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-6.pdf>

[10] A.V.Eskin, V.A.Zhmud', V.G. Trubin. Besprovodnoj udlnitel' posledovatel'nogo porta na baze radiokanala BLUETOOTH. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 2 (4). С. 42-47. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2013-05.pdf>

[11] A.Ju.Ivojllov, A.V. Eskin, V.A. Zhmud', V.G. Trubin. Osobennosti raboty s ZhKI displeem NOKIA 5110. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 4 (6). С. 8-13. См. также URL: http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-4-2013-01_1.pdf

[12] V.A. Zhmud', A.S. Kamenskaja, K.V. Kurbet'ev, V.G. Trubin. Graficheskij OLED displej UG-2864ASGGG14: Pervoe vkljuchenie. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2016. № 1 (15). С. 29-37.

Sm. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2016-4.pdf>

[13] V.A. Zhmud', V.G. Trubin, A.V. Sumenkov, M.V. Trubin. Svedtodiodka indikacija na osnove mikroshemy MAX7219. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2016. № 2 (16). С. 86-96. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-2-2016-11.pdf>

[14] V.A. Zhmud', I.V. Trubin, M.V. Trubin. Proektirovanie sensornyh knopok na baze mikroshemy TTP-224. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2015. № 1 (11). С. 70-74. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-10.pdf>

[15] D.S. Fedorov, A.Ju. Ivojllov, V.A. Zhmud', V.G. Trubin. Ispol'zovanie izmeritel'noj sistemy MPU 6050 dlja opredelenija uglovnyh skorostej i linejnyh uskorenij. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2015. № 1 (11). С. 75-80. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-1-2015-11.pdf>

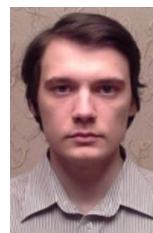
[16] V.G., Trubin M.V. Trubin. Modul' vosproizvedeniya zvukovyh signalov JQ6500-16P. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2015. № 3 (13). С. 58-63. См. также URL: <http://jurnal.nips.ru/sites/default/files/%D0%90%D0%98%D0%9F%D0%98-3-2015-6.pdf>

[17] V.N. Veprik, V.G. Trubin. Mikrokontrollery firmy MOTOROLA (Semejstvo MS68NS11). Ucheb. posobie. M-vo obrazovaniya Ros. Federacii, Novosib. gos. tehn. un-t. Novosibirsk, 2004.

[18] Википедия. ARM (архитектура). URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_\(%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/ARM_(%D0%B0%D1%80%D1%85%D0%B8%D1%82%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%83%D1%80%D0%B0))



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук. E-mail: oao_nips@bk.ru



Андрей Юрьевич Ивойлов - аспирант кафедры Автоматики НГТУ E-mail: iau13hv@mail.ru



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

II. Робототехника. Электроника. Программные средства и системы.

Содержание раздела:

- Н.М. Полевой, А.М. Гиацинтов. Требования к компоненту визуализации виртуального окружения в имитационных системах. ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва Автоматика и программная инженерия. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 34–40.

Требования к компоненту визуализации виртуального окружения в имитационных системах

Н.М. Полевой, А.М. Гуацинтов
(ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва)

Аннотация: В статье приводятся характеристики подсистемы визуализации тренажерно-обучающих систем, необходимые, в том числе, для АТ 7-го типа по классификации ICAO, влияющие на повышение адекватности отображения окружающей обстановки. Также учет указанных характеристик необходим при проведении квалификационной оценки системы в целом. Предложена архитектура графического модуля, применимого для синтеза виртуального окружения: ландшафта, погодных явлений, статических и динамических объектов, а также реализующего автоматическую перекомпиляцию шейдеров при изменении параметров. Графический модуль также поддерживает ряд эффектов пост-обработки (эффекты свечения (*bloom*), глубины резкости или смазывания движения), прямой рендеринг и различные техники рендеринга с отложенным освещением, редактируемый конвейер рендеринга для быстрого переключения между техниками рендеринга. Статья может быть полезна для разработчиков систем визуализации, а также для эксплуатантов тренажерно-обучающих систем.

Ключевые слова: система визуализации, тренажерно-обучающие системы, визуальные эффекты, шейдеры, графический модуль, моделирование окружающей среды, авиатренажер, рендеринг

ВВЕДЕНИЕ

Подготовка квалифицированных специалистов с использованием тренажерно-обучающих систем (далее ТОС) – один из важнейших элементов обеспечения безопасной эксплуатации сложных технических комплексов. Подобная подготовка позволяет снизить частоту возникновения нештатных, аварийных ситуации по причине ошибочных действий персонала. Учитывая, что человеческий фактор продолжает оставаться основной причиной происшествий, развитие технологий построения тренажерно-обучающих систем является актуальной задачей [1].

Составной частью ТОС (в том числе авиационных тренажеров - АТ) является подсистема визуализации - тренажерный имитатор, воспроизводящий визуальную обстановку, соответствующую реальной [2].

Подсистема должна обеспечивать визуализацию высоко-реалистичных виртуальных сцен большой сложности в реальном режиме времени.

Для подсистемы визуализации АТ определены следующие характеристики:

1. Визуальные эффекты. Определяют тип устройства отображения внекабинной визуальной обстановки (например, коллиматорный или бесколлиматорный) и зоны обзора (по горизонтали и вертикали), необходимые, чтобы пилоты видели адекватное изображение из определенной точки.

2. Окружающая обстановка – метеоусловия. Определяет уровень адекватности моделирования окружающей среды и погоды, от температуры и давления до полного моделирования грозы, и т.п.

3. Окружающая обстановка - Аэродромы и прилегающая местность. Определяет уровень адекватности моделирования и требуемый уровень детализации имитируемого аэродрома и прилегающей местности. Включает в себя требования к типовым и специализированным аэродромам, требования к визуальной обстановке, данным о высоте местности и базам данных EGPWS (*Enhanced Ground Proximity Warning System* - усовершенствованная система предупреждения опасного сближения с землей).

4. Прочие характеристики. Определяют технические требования для следующих компонентов: система самодиагностики, система автоматического тестирования, аппаратное обеспечение, система обновления программного обеспечения, система интеграции. Система самодиагностики предназначена для тестирования аппаратной составляющей АТ, его ресурсов и программных компонентов. Система автоматического тестирования проводит оценку адекватности моделирования при определенных условиях и проверяет полученные результаты на выход за границы допустимых значений [3].

1. УРОВНИ АДЕКВАТНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК АВИАЦИОННЫХ ТРЕНАЖЕРОВ

Согласно руководству ICAO Doc 9625, выделяется семь типов авиационных тренажеров (АТ) (Таблица 1). Седьмой тип

подходит для отработки всех существующих учебных задач. Далее идут тренажеры без некоторых подсистем (например, без подсистемы подвижности), или с пониженным

уровнем адекватности (например, с применением мониторов для отображения внекабинной обстановки).

Таблица 1

Уровни адекватности моделирования характеристик АТ в зависимости от типа подготовки и свидетельства пилота

Тип АТ	Тип свидетельства пилота	Тип подготовки	Моделирование визуальных эффектов	Моделирование окружающей среды: аэродромы и прилегающая местность
VII	MPL4 - Advanced	T+TP - подготовка и профессиональная подготовка	S – полное соответствие	R – общие признаки
	TR / ATPL	TP - профессиональная подготовка	S – полное соответствие	R – общие признаки
	Re	T - подготовка	S – полное соответствие	R – общие признаки
	RL / RO / IO / CQ	TP - профессиональная подготовка	S – полное соответствие	R – общие признаки
VI	MPL3 - Intermediate	T+TP - подготовка и профессиональная подготовка	S – полное соответствие	R – общие признаки
V	TR / ATPL / RL / RO / IO	T - подготовка	R – общие признаки	R – общие признаки
IV	MPL2- Basic	T+TP - подготовка и профессиональная подготовка	G – соответствие в главном	R – общие признаки
III	CR	T - подготовка	R – общие признаки	G – соответствие в главном
II	IR	T - подготовка	G – соответствие в главном	G – соответствие в главном
I	CPL	T - подготовка	R – общие признаки	G(S) - соответствие в главном, полное соответствие, при выполнении подготовки по правилам визуального полета
	MPL1 - Core flying skills	T - подготовка	G – соответствие в главном	G – соответствие в главном
	PPL	T - подготовка	R – общие признаки	R(S) – общие признаки, полное соответствие, при выполнении подготовки по правилам визуального полета

Для моделирования визуальных эффектов: *полное соответствие* – воспроизведение реального визуального окружения в перспективе, создание условий для аккомодации глаз на бесконечность; *соответствие в главном* - моделирование реального визуального окружения в перспективе; *общие признаки* - общие признаки реального визуального окружения в перспективе, достаточные для выполнения простого полета по приборам, инструментального захода на посадку.

Моделирование окружающей обстановки - аэродромы и прилегающая местность: *полное соответствие* - воспроизведение реального окружения с максимально возможной точностью для любого заданного места; *соответствие в главном* - моделирование реального окружения; *общие признаки* - простое

моделирование основных особенностей реального окружения.

2. ТРЕБОВАНИЯ К ПОДСИСТЕМЕ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Согласно документу ICAO Doc 9625, далее приводятся требования к подсистеме визуализации для 7-го типа АТ, пригодного для подготовки практически на все типы свидетельств пилота.

Подсистема визуализации должна обеспечивать непрерывную визуальную зону обзора с бесконечной перспективой и текстурированным представлением всех условий окружающей среды для каждого пилота. Горизонтальная (не менее 200°) и вертикальная (не менее 40°) зоны обзора обеспечат визуализацию сложных маневров, в

т.ч. требующих постоянной видимости взлетно-посадочной полосы (далее ВПП).

АТ должен обеспечивать точное воспроизведение виртуального окружения в зависимости от пространственного положения ВС.

Требуется полностью интегрированное динамическое моделирование окружающей среды, включая точное моделирование атмосферы и погодных условий, таких как грозы, сдвиг ветра, турбулентность, микропорывы и соответствующие типы осадков. Для обеспечения целостности необходимо, чтобы окружающая среда была смоделирована с учетом возможностей конкретного самолета и характеристик подсистемы моделирования.

В АТ необходимо реализовать моделирование стандартной атмосферы. Международная стандартная атмосфера (МСА) — гипотетическое вертикальное распределение температуры, давления и плотности воздуха в атмосфере Земли, которое по международному соглашению представляет среднегодовое и среднеширотное состояние. [4] Цель создания МСА - унификация исходных значений параметров атмосферы, используемых при расчетах и проектировании авиационной техники, обработке результатов геофизических и метеорологических наблюдений и для приведения результатов испытаний летательных аппаратов и их элементов к одинаковым условиям. Основой для расчета параметров МСА служат уравнения статики атмосферы и состояния идеального газа. В ряде стран на базе МСА создаются национальные стандартные атмосферы. В России, например, используется ГОСТ 4401-841 «Атмосфера стандартная». [5]

В АТ должно быть реализовано моделирование сдвига ветра, которое обеспечивает обучение и, при необходимости, корректировку действий пилота в следующих критических фазах полета: до команды подъем, в момент отрыва, во время набора высоты, на конечном участке захода на посадку - ниже 150 м над уровнем земной поверхности.

Необходимо моделирование следующих погодных явлений и соответствующих органов управления параметрами для инструктора: многочисленные слои облаков с настраиваемым основанием, вершиной, зоной покрытия и скоростью перемещения; активация или деактивация грозных фронтов; видимость и дальность видимости на ВПП, в том числе эффект тумана и неоднородного тумана; эффекты внешнего освещения объекта; влияние на освещение аэропорта (в том числе различную интенсивность и эффекты тумана); моделирование пыли, грязи, загрязнителей поверхности (включая эффект перемещения ветром); эффект переменных осадков (дождь, град, снег); эффекты, связанные с воздушной скоростью в облаках; постепенные изменения видимости при входе и выходе из облака.

Требуется возможность задания следующих параметров: скорость ветра у поверхности, направление и порывы, турбулентность; скорость ветра и направление на средней и большой высоте; грозы и микропорывы.

В составе тренажера должны быть представлены конкретные модели аэропорта с топографическими особенностями, с учетом направлений взлетно-посадочных полос, разметки, освещения, размеров и рулежных дорожек. В системе требуется наличие не менее трех заданных реальных аэропортов, визуализируемых в условиях дневного и сумеречного (заход или восход солнца) освещения, а также в ночное время. Базы данных виртуальных ландшафтов и *EGPWS* должны иметь не противоречащую информацию для возможности проведения тренировок и во избежание *CFIT* (столкновение с землей в управляемом полёте) происшествий. Если на тренажерном устройстве планируется выполнять полеты в условиях ограниченной видимости то, по крайней мере, одна сцена с аэропортом должна поддерживать такую функциональность. Например, необходима возможность визуализации движения по рулежной дорожке в условиях низкой видимости, при наличии разметки направления движения, ограждающих проблесковых маячков и необходимого светосигнального оборудования ВПП и посадочного коридора.

Подсистема визуализации должна отображать следующие визуальные эффекты: свечение от мачт освещения; боковые огни ВПП, свечение от посадочных огней в условиях низкой видимости, прежде чем станут видны сами посадочные огни. Требуется воспроизводить визуальные объекты, позволяющие оценить скорость снижения и восприятие глубины при выполнении взлета и посадки, в т.ч. должны отображаться: поверхности ВПП, рулежные дорожки, стояночные площадки; особенности местности (рельефа); подробная и точная модель изображения поверхности рельефа, в пределах 400 м до ВПП и в пределах 400 м после взлетно-посадочной полосы, а также область шириной приблизительно 400 м, включающая в себя взлетно-посадочную полосу.

При оценке степени размытия изображения при движении необходимо продемонстрировать, что размытие изображения не превышает заданных значений, которые были получены на реальных ВС и не отвлекают в учебной обстановке.

Необходима возможность обеспечивать воспроизведение визуальной обстановки в условиях светлого времени суток: полноцветное представление и достаточное количество поверхностей с соответствующими текстурами для успешного визуального отображения аэропорта, ВПП и близлежащих территорий. Тени на поверхностях должны соответствовать

расчетному положению солнца. Требуется обеспечить отображение 16-ти одновременно движущихся объектов. Движущиеся объекты должны иметь 6 степеней свободы и двигаться во время теста. Не менее 10000 видимых текстурированных поверхностей, 6000 огней, 16 движущихся моделей должны отображаться одновременно.

Необходимо поддерживать отображение визуальной обстановки в условиях сумерек, со стандартными объектами, такими как поля, дороги и водные объекты с адекватной имитацией цветов в условиях низкой освещенности. Кроме того, необходимо отображать объекты, освещенные бортовыми источниками света (например, посадочными огнями). Общая детализация сцены должна быть сопоставима с детализацией изображения, созданного из 10000 видимых текстурированных поверхностей и 15000 видимых огней, а также включать самоосвещаемые объекты, такие как улично-дорожные сети, освещение стоянок и световая маркировка аэропорта, необходимые для успешного захода на посадку, приземления и движения ВС по аэродрому. Система должна обеспечить отображение 16-ти одновременно движущихся объектов и различимый горизонт.

В ночном режиме подсистема визуализации обеспечивает все возможности отображения, сцены в сумерках, как это определено выше, с добавлением функционала визуализации окружающей обстановки с уменьшенной яркостью, которая бы скрывала те ориентиры на земле, которые не имеют самоосвещения или не освещаются бортовыми огнями (например, посадочными огнями). Движущиеся объекты должны иметь 6 степеней свободы и двигаться во время теста. Не менее 10000 видимых текстурированных поверхностей, 15000 огней, 16 движущихся моделей должно отображаться одновременно.

Модели аэропорта должны включать в себя типичные стационарные и динамические помехи, такие как телескопические трапы аэропорта, самолеты и оборудование наземного обслуживания. Данные о аэропортах, используемых в системе, должны обновляться, чтобы они соответствовали реальным аэропортам.

3. АРХИТЕКТУРА ГРАФИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Для реализации приведенных требований система визуализации включает: графический модуль, являющийся ядром подсистемы, и расширения, содержащие отдельные функциональные блоки. Расширения представляются в виде надстроек для графического модуля. Особенности используемого графического модуля:

- Использование системы *ubershader* позволяет автоматически перекомпилировать

шейдеры при изменении параметров (используются *GLSL* шейдеры)

- Пост-обработка: эффекты свечения (*bloom*), глубины резкости или смазывания движения

- Поддержка прямого рендеринга и различных техник рендеринга с отложенным освещением

- Поддержка освещения и текстур *HDR* (*High Dynamic Range*)

- Поддержка различных техник рендеринга

- Поддержка отражений в реальном времени

- Поддержка теней в реальном времени

- Системы частиц, способные отбрасывать тени и обрабатывать эффекты типа смазывания движения (*motion blur*)

- Поддержка формата текстур *DDS* и других форматов изображений

- Редалируемый конвейер рендеринга для быстрого переключения между различными техниками рендеринга.

Процедурный интерфейс не мешает использовать графический модуль в объектно-ориентированных языках программирования. Графический модуль построен с использованием объектно-ориентированного подхода. Объекты модуля, такие как узлы графа сцены или ресурсы предоставляются приложению через дескрипторы. Дескриптор во многом похож на указатель, но работает не напрямую с объектом для большей безопасности. Модуль использует специальные функции для создания объектов, которые всегда возвращают дескриптор созданного объекта или нулевой дескриптор (аналогичный нулевому указателю) в случае ошибки. Дескриптор должен храниться в приложении и может быть использован для изменения свойств объекта или его выгрузки. Из-за высокого уровня абстракции интерфейса прикладного программирования (*API*) пользователь не может добавлять новую функциональность, например, новый тип узла сцены, без модификации исходных кодов графического модуля. Для преодоления этого недостатка, графический модуль предоставляет механизм расширений, который дает пользователю полный доступ к его внутренней структуре. Расширение статически присоединяется к библиотеке движка и предоставляет свою функциональность через процедурный интерфейс.

В графическом модуле ресурсом программируемого конвейера является *XML* документ, описывающий этапы процесса рендеринга. Программируемый конвейер может определять цели рендеринга, служащие выходными буферами и хранящими временные результаты рендеринга. Цели рендеринга могут быть различного размера и формата, а также

могут содержать несколько буферов цвета и глубины. Команды программируемого конвейера определяют способ прорисовки заданной геометрии и выходной буфер. Выбор прорисовываемой геометрии определяют классы материалов, а техника рендеринга определяется выбранным контекстом шейдера. Команды объединены в этапы, каждый из которых можно выполнить или исключить. После заполнения буфера, его возможно использовать снова в качестве входной текстуры на следующем этапе рендеринга. Такое использование входных и выходных буферов позволяет реализовывать множество различных эффектов пост-обработки и улучшенные техники рендеринга.

Одним из основных элементов системы рендеринга графического модуля являются шейдеры. Шейдеры – это программы, выполняемые на графической карте. У всех видеокарт есть аппаратный конвейер, обрабатывающий входящие полигональные данные и выводящий их на экран. Этот конвейер состоит из нескольких этапов, таких как трансформация входящих вершин, растеризация треугольников и расчет окончательного цвета пикселей в буфере кадра. Существует три типа шейдеров, настраивающих этапы рендеринга изображения: вертексные (вершинные), геометрические, и фрагментные (пиксельные). Отдельно выделяются вычислительные (*compute*) шейдеры.

Вершинный шейдер выполняется для каждой вершины входных данных. Основной его задачей является трансформация позиции вершины в трехмерном пространстве и вычисление ее позиции на двумерной поверхности для выведения на экран. Вершинный шейдер также может оперировать такими свойствами вершин, как цвет или текстурные координаты, а также передавать результаты своей работы в следующий этап рендеринга. Вершинный шейдер не может создавать или удалять вершины.

Геометрические шейдеры могут создавать новые примитивы, такие как треугольники или линии. Они выполняются после вершинных шейдеров. Геометрические шейдеры полезны для реализации полностью на видеокарте таких алгоритмов, как тесселяция и расчет теней. Геометрические шейдеры поддерживаются только на видеокартах, использующих *DirectX 10* или *OpenGL 3.3*.

Фрагментный шейдер (также известный как пиксельный) рассчитывает цвет и глубину каждого пикселя в выходном буфере. Из-за того, что в настоящий момент большинство операций освещения выполняются для пикселей, а не для вершин, пиксельные шейдеры используются для реализации большинства визуальных эффектов.

Вычислительные шейдеры - программы, запущенные на видеокарте, которые напрямую

не связаны с графическим конвейером. Они могут быть использованы для массивных параллельных *GPGPU* алгоритмов или для ускорения элементов рендеринга.

По умолчанию графический модуль содержит два подхода обработки освещения – прямой и отложенный. Прямое освещение - это стандартная техника, используемая в большинстве приложений. При использовании данной техники геометрия прорисовывается для каждого источника света, используя специальный пиксельный шейдер, рассчитывающий влияние света. Главным недостатком этого подхода является необходимость перерисовывать геометрию столько раз, сколько в сцене источников света, что может значительно снизить производительность в сценах с большим количеством полигонов и источников света. Отложенный подход рассчитывает освещение сцены как шаг пост-обработки. Преимуществом данного подхода является скорость расчета освещенности, т.к. влияние всех источников света на геометрию рассчитывается один раз. Это позволяет реализовать сложное динамическое освещение в сценах. Примером эффективности данного подхода может служить визуализация сцены с более чем 200 перемещающимися источниками света в реальном времени. Недостатками данного метода является сложность реализации механизма сглаживания и обработки полупрозрачных объектов, а также высокие требования к производительности и объему видеопамати видеокарты.

Граф сцены используется для представления логической или пространственной структуры сцены, которую необходимо визуализировать. Обычно он также используется для ускорения поиска по узлам сцены и таких операций, как определение столкновений между узлами и отсечение по пирамиде видимости. На практике, существует множество реализаций графа сцены, каждая со своими достоинствами и недостатками. Некоторые графические модули применяют направленные и ненаправленные графы, а некоторые используют циклы. Граф сцены реализован в виде дерева. Каждый узел может иметь неограниченное число дочерних узлов, но модуль накладывает некоторые ограничения на иерархию, и, определяет типы узлов, которые могут быть присоединены только к определенному типу родительского узла. Только такие сущности, как модели, частицы и т.д., имеющие трансформации и, соответственно, местонахождение в виртуальном мире, представляются как узлы. Все другие абстрактные сущности, такие как материалы, представлены как свойства узлов. Данный подход позволяет сократить количество узлов в графе и повысить производительность операций над деревом.

Доступны следующие типы узлов сцены:

группа, камера, источник света, трехмерная модель, генератор частиц.

Ресурс – это объект данных, необходимый для рендеринга сцены, например, текстура или шейдер. Одним важным свойством ресурсов является возможность их повторного использования. Это значит, что на ресурс может ссылаться несколько объектов, таких как узлы графа сцены, но загружен он должен быть только один раз. Каждому ресурсу присваивается имя, уникальное для каждого типа ресурсов, при помощи которого этот ресурс смогут использовать объекты.

Все ресурсы управляются менеджером ресурсов. Менеджер ресурсов содержит список ресурсов и обеспечивает, чтобы ресурсы были загружены только один раз и в последствие использовались повторно. Менеджер ресурсов также используется для поиска ресурсов, доступа к ним и удаления. Графический модуль использует единый менеджер для всех типов ресурсов, а не отдельные менеджеры для каждого типа ресурсов. Для более эффективного управления ресурсами, в менеджере применяется счетчик ссылок на ресурс. Ресурс может быть удален, только если на него больше не ссылаются объекты, такие как узел сцены или другой ресурс. Существует возможность сбора мусора для выгрузки и удаления всех неиспользуемых ресурсов.

Графический модуль использует отложенную загрузку ресурсов. Это означает, что создание ресурса и его загрузка являются отдельными этапами. Преимуществом такого разделения является то, что ресурс не должен быть доступен сразу же после создания, а может быть загружен в фоне в отдельном потоке.

Система анимации, применяемая в модуле, позволяет производить обработку твердых тел, скелетную, лицевую анимацию при помощи морфинга. Система поддерживает плавный переход от одного кадра анимации к другому, а также позволяет смешивать анимации (*animation blending*). Система работает напрямую с графом сцены, поэтому возможна ручная трансформация объектов для динамических анимаций, таких, как обратной кинематики или *Ragdoll*-физики [6].

Плавный переход от одной анимации к другой достигается за счет их комбинирования. Для достижения приемлемых визуальных результатов, модели в графическом модуле могут применять одновременно несколько трансформаций, на основе которых создается финальная анимация.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При подготовке операторов сложных технических систем, большую роль играют имитационно-тренажерные комплексы, которые в максимально возможной степени приближены к реальным установкам и позволяют тренирующимся приобрести правильные и

устойчивые навыки. В статье выделены уровни адекватности моделирования характеристик АТ, относящихся к подсистеме визуализации, в зависимости от типа подготовки и выдаваемого свидетельства. Так же приводятся требования к подсистеме визуализации для АТ 7-го типа по классификации ICAO, который подходит для отработки практически всех существующих учебных задач. Предложена архитектура графического модуля, реализующего автоматическую перекомпиляцию шейдеров при изменении параметров, эффекты пост-обработки (эффекты свечения (*bloom*), глубины резкости или смазывания движения), прямой рендеринг и различные техники рендеринга с отложенным освещением, редактируемый конвейер рендеринга для быстрого переключения между техниками рендеринга.

БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполняется при поддержке РФФИ, грант № 14-07-00020-а.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Решетников В.Н., Мамросенко К.А. Основы построения тренажерно-обучающих систем сложных технических комплексов. Программные Продукты И Системы. 2011. № 3. С. 86–90.
- [2] ГОСТ 21659-76 Тренажеры авиационные. Термины и определения. 1976.
- [3] Organization I.C.A. Doc 9625-AN/938 Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Training Devices. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2009.
- [4] Международная стандартная атмосфера [Электронный ресурс]. URL: dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/2697/Mezhdunarodna_ua (дата обращения: 10.02.2016).
- [5] ГОСТ 4401-81 Атмосфера стандартная. Параметры // 1981.
- [6] Гиацинтов А.М., Мамросенко К.А. Методы анимации виртуальной камеры и отображения объектов с частичной прозрачностью в тренажерно-обучающих системах. Информационные Ресурсы России. 2011. №6 (124). С. 31–34.

Requirements to Virtual Environment Visualization Component in Simulation Systems

N.M. POLEVOY, A.M. GIATSINTOV

Abstract: Article specifies main requirements for environment visualization, including those for 7th type ICAO trainers, and provides a feature review of visualization subsystem of training simulation systems (TSS). Compliance with these requirements is necessary in order to pass qualifications assessment of the whole trainer. Architecture of graphics engine that can be used for synthesis of virtual landscape, environment and weather effects, as well as static and dynamic objects, and supports a number of post-processing

effects, like bloom, depth of field and motion blur, is described. This article can be useful for developers of visualization systems and training simulation system's operators.

Key words: visualization system, training simulation systems, visual effects, shaders, graphics engine, trainer, rendering, environmental modeling

REFERENCES

- [1] Reshetnikov V.N., Mamrosenko K.A. Osnovy postroenija trenazherno-obuchajushhih sistem slozhnyh tehniceskikh kompleksov. Programmnye Produkty I Sistemy. 2011. № 3. S. 86–90.
- [2] GOST 21659-76 Trenazhery aviacionnye. Terminy i opredelenija. 1976.
- [3] Organization I.C.A. Doc 9625-AN/938 Manual of Criteria for the Qualification of Flight Simulation Training Devices. Montreal, Canada: International Civil Aviation Organization, 2009.
- [4] Mezhdunarodnaja standartnaja atmosfera

[Jelektronnyj resurs]. URL: dic.academic.ru/dic.nsf/enc_tech/2697/Mezhdunarodnaja (data obrashhenija: 10.02.2016).

- [5] GOST 4401-81 Atmosfera standartnaja. Parametry. 1981.
- [6] Giacintov A.M., Mamrosenko K.A. Metody animacii virtual'noj kamery i otobrazhenija ob#ektov s chastichnoj prozrachnost'ju v trenazherno-obuchajushhih sistemah // Informacionnye Resursy Rossii. 2011. №6 (124). S. 31–34.

Полевой Николай Михайлович – старший программист, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, аспирант кафедры «Космические телекоммуникации».

E-mail: nick.m.p.work@gmail.com

Гиацинтов Александр Михайлович – научный сотрудник, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН.

E-mail: algts@inbox.ru

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

Содержание раздела:

- В.А. Жмудь, И.Л. Рева, Л.В. Димитров. Влияние вида тестовых сигналов на результат численной оптимизации регуляторов. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), Технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 43–53.
- В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Обоснование применения сигналов сложной формы при численной оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), Технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 54–58.
- В. А. Жмудь, И. Л. Рева, Любомир В. Димитров. Новый подход к задаче проектирования робастных регуляторов. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), Технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 59–64.

Влияние вида тестовых сигналов на результат численной оптимизации регуляторов

Вадим А. Жмудь¹, Иван Л. Рева¹, Любомир В. Димитров²

¹ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), ²Технический университет Софии (София, Болгария)

Аннотация: Управление робототехническими объектами, как и любыми другими механическими и прочими устройствами, зачастую требует достижения не только нулевой статической ошибки, то есть ошибки при устранении влияния постоянной помехи, но также и нулевой динамической ошибки при обработке линейно нарастающего изменения задания или помехи. Традиционно считается, что если система успешно обрабатывает ступенчатое задание, то она столь же успешно обрабатывает и все остальные виды заданий, поскольку их можно представить, как сумму бесконечного числа бесконечно малых ступенчатых скачков. На практике это не так. Если система качественно обрабатывает скачок, то при обработке линейно нарастающего воздействия в системе может иметь место постоянная по величине ошибка. Для подавления этой ошибки требуется дополнительный интегратор в регуляторе. Если при оптимизации такого регулятора использовать ступенчатый скачок в качестве тестового задания, то численная оптимизация не приведет к правильному расчету коэффициента в тракте с двойным интегрированием. Если же в качестве тестового задания использовать линейно нарастающий сигнал, то полученная система будет обладать избыточным перерегулированием при обработке ступенчатого воздействия. В статье впервые предлагается методика решения этой задачи путем численной оптимизации регулятора, используемого при моделировании одновременно двух систем, одна из которых обрабатывает ступенчатое воздействие, а другая – линейно нарастающее воздействие.

Ключевые слова: управление, замкнутые контуры, регуляторы, проектирование управляющих систем, цифровое управление, обратная связь, оптимизация, астатизм, ПИ-регуляторы, ПИД, ПИ²Д

ВВЕДЕНИЕ

Астатическое управление объектами требуется во многих прикладных задачах [1–4]. Оно состоит в том, что за счет интегратора в регуляторе статическая ошибка равна нулю. Если на вход такой системы подается команда изменить выходную величину на постоянное приращение (ступенчатый скачок), то по истечении некоторого времени, равного длительности переходного процесса, эта команда будет выполнена с нулевой ошибкой. Также такая система полностью подавляет влияние действующей на нее постоянной помехи.

В механических системах, прежде всего,

робототехнических, часто также требуется система с астатизмом второго порядка. Это свойство означает, что система обрабатывает с нулевой ошибкой не только ступенчатое воздействие, но и линейно нарастающее воздействие. Это в равной мере относится к изменениям задания и к помехе. Такое свойство, как правило, достигается за счет применения двух интеграторов в регуляторе.

Как правило, предполагается, что система с астатизмом второго порядка точнее, чем система с астатизмом первого порядка, из чего можно сделать заключение (как далее будет показано, ошибочное) о том, что такая система лучше обрабатывает помеху и управляющее воздействие в виде ступенчатого скачка. На самом деле исследования показывают, что настройки регулятора, обеспечивающие лучшую обработку ступенчатого скачка, отличаются от настроек, обеспечивающих лучшую обработку линейно нарастающего воздействия. Если же требуется, чтобы система лучше обрабатывала и ступенчатые воздействия, и линейно нарастающие, то необходимо отыскивать компромиссное решение этих двух задач.

Настоящая статья вскрывает противоречия между рассмотренными двумя требованиями и предлагает методику достижения требуемого компромисса путем численной оптимизации регуляторов с использованием соответствующих целевых функций.

Традиционная структура системы с регулятором показана на *Рис. 1*. Ошибка системы при обработке изменения задания $V(t)$ по форме в точности совпадает с ошибкой при обработке такого же изменения помехи $H(t)$, а по знаку эти ошибки противоположны. Поэтому достаточно изучить поведение системы при обработке задания, чтобы обеспечить качественную обработку как задания, так и помехи. Качество системы определяется качеством всего контура, которое обеспечивает правильный выбор математической модели регулятора. Если используется пропорционально-интегральный регулятор (ПИ), или пропорционально-дифференциально-интегральный регулятор (ПИД), то система, как правило, обладает астатизмом первого порядка, то есть статическая ошибка равна нулю только при обработке ступенчатого воздействия. Для получения

астатизма второго порядка в регулятор должно вводиться дополнительное интегрирование. Получаемый регулятор называют ПИ²Д, где двойка указывает на наличие двух последовательно соединенных интеграторов в регуляторе.

Для расчета коэффициентов регулятора целесообразно использовать метод численной оптимизации [1–37]. Этот метод реализуется по

схеме, показанной на *Рис. 2*. А именно, в структуре для оптимизации содержится собственно модель системы, представляющая собой модель контура по *Рис. 1*, а также анализатор качества системы и оптимизатор регулятора. Для простоты также эти два блока можно объединять в общий блок под названием, например, «анализатор-оптимизатор».

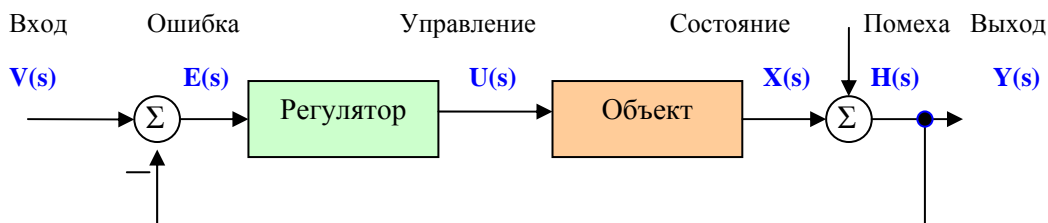


Рис.1 . Традиционная схема системы автоматического управления с единичной обратной связью

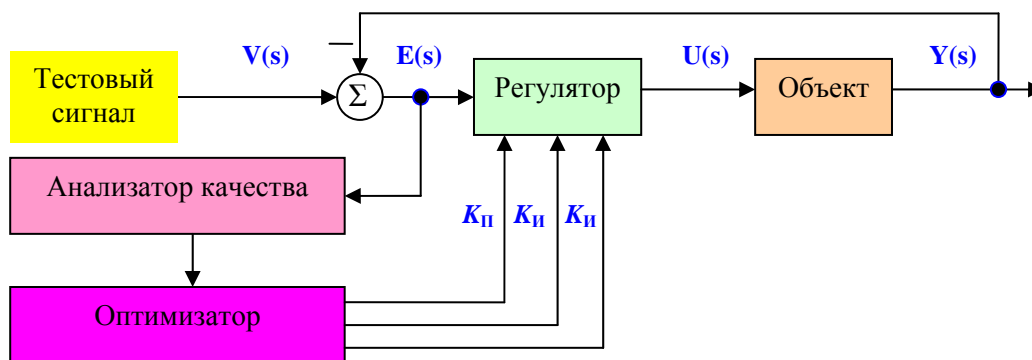


Рис.2 . Традиционная структура для численной оптимизации регулятора

При работе системы по *Рис. 2* необходимо на вход модели системы подавать тестовые воздействия. Традиционно такие воздействия формируются в виде единичного ступенчатого скачка. Если требуется система, которая обладает астатизмом первого порядка, такое тестовое воздействие вполне приемлемо. Если же требуется астатизм второго порядка, то при использовании тестового воздействия в виде скачка оптимизатор не будет иметь причин для изменения коэффициента в тракте с двойным интегрированием, поэтому результат оптимизации будет неудовлетворительным. Следовательно, требуется использовать тестовый сигнал в виде линейно нарастающего воздействия.

Однако, исследования показали, что если использовать линейно нарастающий тестовый сигнал, то по результатам оптимизации получается такая система, в которой качество отработки ступенчатого воздействия неудовлетворительно, а именно: в системе при отработке скачка присутствует излишне большое перерегулирование.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть объект описывается передаточной функцией в виде фильтра низких частот третьего порядка и звена чистого запаздывания:

$$W(s) = \frac{\exp(-\tau s)}{(T_1 s + 1)(T_2^2 s^2 + \xi T_2 s + 1)} \quad (1)$$

Здесь s – аргумент функции Лапласа, остальные величины в числителе и знаменателе справа – постоянные коэффициенты.

Требуется рассчитать регулятор, обеспечивающий качественную отработку ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия. Требование качества состоит в уменьшении насколько возможно величины ошибки и сокращении насколько возможно времени затухания ошибки до нуля или до пренебрежимо малой величины.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Для управления объектом предлагается ПИД-регулятор, а если этого недостаточно, то регулятор с двойным интегрированием, называемый ПИ²Д-регулятор.

Предлагается численная оптимизация с помощью средств моделирования и оптимизации *VisSim*. Простейшая стоимостная функция для оптимизации имеет следующий вид [6–10]:

$$\Psi_1(T, e) = \int_0^T |e(t)| dt. \quad (2)$$

Здесь $e(t)$ – ошибка управления, t – время с начала переходного процесса, T – момент окончания моделирования.

Также в стоимостную функцию может быть введено дополнительное слагаемое следующего вида:

$$\Psi_2(T, e) = \int_0^T \max\{0, e(t) \frac{de(t)}{dt}\} dt. \quad (3)$$

При суммировании функций (2) и (3)

целесообразно использовать весовой коэффициент. Предположительно, перед вторым слагаемым такой коэффициент должен иметь значение много больше единицы.

Результат оптимизации предлагается контролировать по виду переходных процессов.

Вследствие указанной выше проблемы с тестовым сигналом предлагается осуществлять одновременное моделирование двух идентичных систем, в каждой из которых идентичны и объект, и регулятор. При этом параметры регулятора задаются оптимизатором. Но на вход одной из систем подаются в качестве тестовых сигналов ступенчатые воздействия, а на вход другой системы подаются линейно нарастающие воздействия. Схема соответствующей структуры показана на *Рис. 3*.

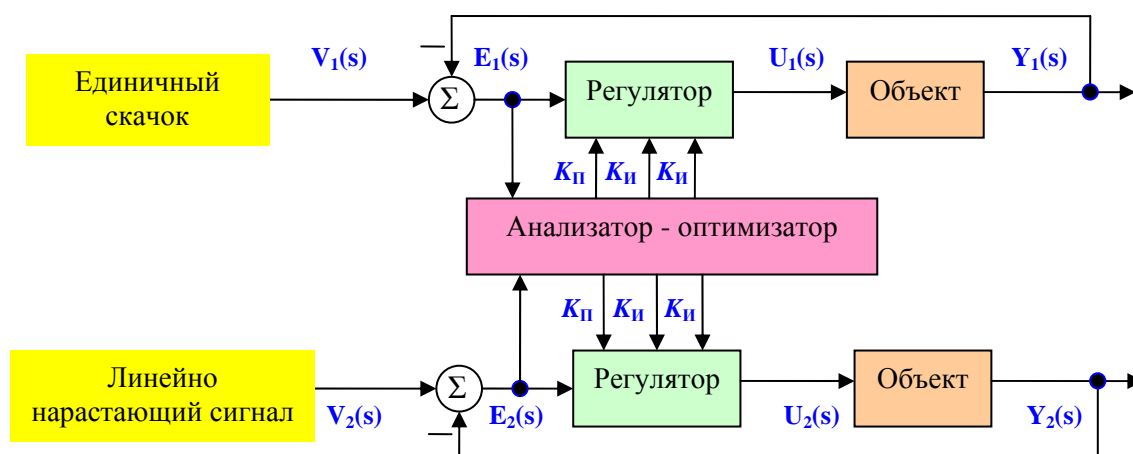


Рис.3. Предлагаемая структура для численной оптимизации регулятора

3. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР И РЕЗУЛЬТАТЫ

Зададим модели объекта конкретные численные значения, например, следующие:

$$W(s) = \frac{\exp(-10s)}{(20s+1)(s^2+2s+1)}. \quad (4)$$

Модель объекта в программе *VisSim* показана на *Рис. 4*, модель всей системы показана на *Рис. 5*. Оптимизация осуществлялась при использовании ступенчатого задания, а также при использовании линейно нарастающего воздействия. В первом случае получены следующие коэффициенты регулятора: $k_p = 2,29$; $k_i = 0,0543$; $k_d = 9,5$. Во втором случае получены следующие коэффициенты регулятора: $k_p = 3,06$; $k_i = 0,496$; $k_d = 23,9$. Полученные переходные процессы в результате оптимизации показаны на *Рис. 6* и *Рис. 7*. При этом на *Рис. 6* приведены результаты отработки каждой из полученных систем линейно нарастающего задания, а на *Рис. 7* приведены результаты отработки каждой из систем задания в виде ступенчатого скачка.

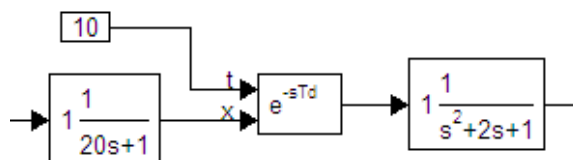


Рис. 4. Модель объекта управления

Анализ полученных процессов на *Рис. 6* показывает, что система, оптимизированная для линейно нарастающего задания, лучше обрабатывает такое задание, статическая ошибка относительно мала. Система, оптимизированная для отработки ступенчатого скачка, обрабатывает линейно нарастающее воздействие с существенной статической ошибкой (на *Рис. 6* она составляет 0,2 единицы).

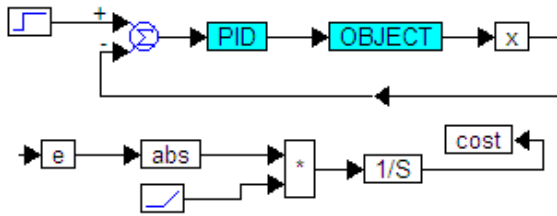


Рис. 5. Модель структуры для оптимизации регулятора в системе

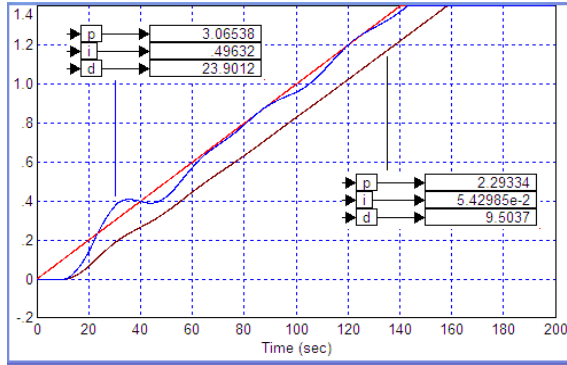


Рис. 6. Результат оптимизации системы при линейно нарастающем задании: нижняя линия -

Вместе с тем, анализ полученных процессов на Рис. 7 показывает, что система, оптимизированная для линейно нарастающего задания, хуже обрабатывает ступенчатое задание: перерегулирование составляет около 180 %, система склонна к колебаниям, за время 200 с процесс еще не заканчивается. Система, оптимизированная для отработки ступенчатого скачка, обрабатывает такое воздействие быстро (за 100 с) и с небольшим перерегулированием (25 %).

Вывод 1: Система, оптимизированная для отработки ступенчатого скачка, плохо обрабатывает линейно нарастающее воздействие,

и наоборот, система, оптимизированная для отработки линейно нарастающего воздействия, плохо обрабатывает ступенчатый скачок.

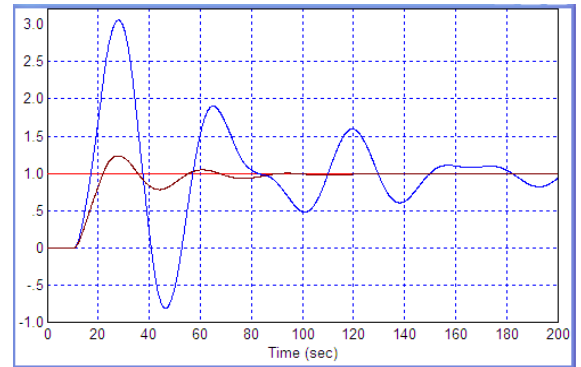


Рис. 7. Результат оптимизации при ступенчатом скачке

4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННОЙ МЕТОДИКИ ОПТИМИЗАЦИИ И РЕЗУЛЬТАТЫ

Для отыскания компромиссного решения предлагается оптимизация ПИД-регулятора, который используется одновременно в двух одинаковых системах, одна из которых обрабатывает ступенчатое воздействие, а другая обрабатывает линейно нарастающее воздействие.

На Рис. 8 показана структура для оптимизации регулятора на основе этого принципа. Здесь стоимостная функция является суммой стоимостных функций вида (2), для вычисления двух слагаемых используются ошибки в двух моделируемых системах. При суммировании без весовых коэффициентов в результате получается следующий набор коэффициентов ПИД-регулятора: $k_P = 2,59$; $k_I = 0,211$; $k_D = 13,97$. Получаемые процессы показаны на рис. 9.

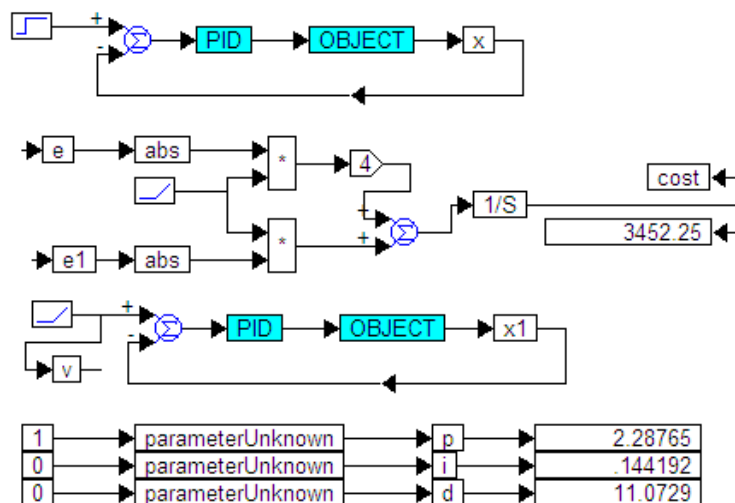


Рис. 8. Структура модели, содержащая две системы и одно устройство для оптимизации ПИД-регулятора

Как видим из Рис. 9, достигнут некоторый

компромисс. Перерегулирование при отработке

ступенчатого скачка снизилось вдвое в сравнении с регулятором, оптимизированным для обработки линейно нарастающего воздействия, то есть до величины 90 %. Статическая ошибка при обработке линейно нарастающего воздействия меньше 0,05 единиц, то есть в 4 раза меньше, чем в регуляторе, оптимизированном для обработки только ступенчатого скачка.

Для снижения перерегулирования можно ввести весовой коэффициент перед слагаемым, зависящим от ошибки в системе, которая обрабатывает ступенчатый скачок. На Рис. 10 показан переходный процесс с системой, полученной с таким коэффициентом, равным четырем. Перерегулирование при обработке скачка снизилось почти до 60 %, статическая ошибка при обработке линейно нарастающего воздействия возросла примерно вдвое. Дальнейшее увеличение этого весового коэффициента позволяет и далее снизить перерегулирование при обработке скачка ценой роста статической ошибки при обработке нарастающего воздействия.

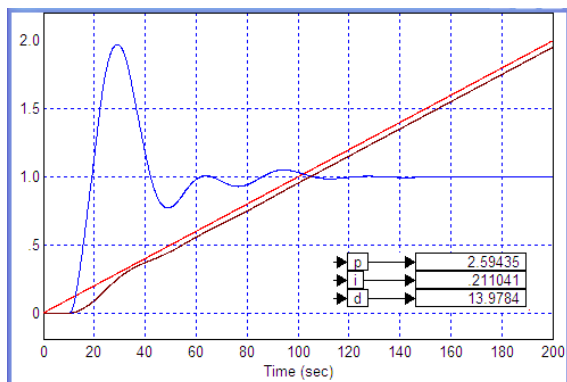


Рис. 9. Переходные процессы в системе, рассчитанной в результате совместной оптимизации двух систем

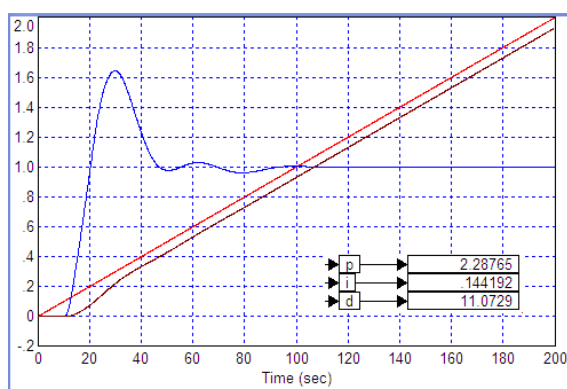


Рис. 10. То же самое с весовым коэффициентом 4

Вывод 2: Система с ПИД-регулятором, оптимизированная по компромиссу между качеством обработки ступенчатого скачка и качеством обработки линейно нарастающего воздействия, обеспечивает требуемый компромисс, но в итоге качество обработки обоих этих воздействий недостаточно высоко.

5. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ С ПОМОЩЬЮ ПИ²Д-РЕГУЛЯТОРА

Система с астатизмом второго порядка должна содержать два интегратора в регуляторе. Поэтому предлагается использовать структуру, показанную на Рис. 11, для оптимизации ПИ²Д-регулятора. Данный регулятор содержит помимо традиционных пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего трактов также тракт двойного интегрирования. Поэтому в структуре отыскивается четыре коэффициента. Также в этой структуре введено дополнительное слагаемое вида (3) в стоимостную функцию. В этой системе при обработке ступенчатого воздействия перерегулирование составляет около 85 %. Время затухания обоих процессов составляет примерно 60 с.

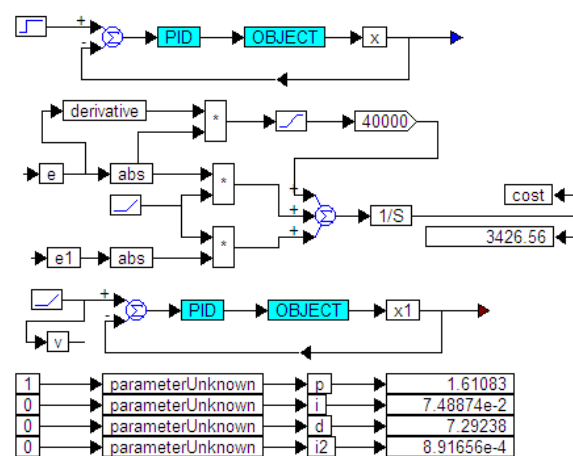


Рис. 11. Итоговая структурная схема для оптимизации ПИ²Д-регулятора

Введенное слагаемое за счет выбора весового коэффициента позволяет осуществить компромиссный поиск коэффициентов, которые бы обеспечили приемлемое качество переходных процессов при обработке обоих видов входных сигналов. Но даже ведение весового коэффициента величиной 1000 не дает существенного снижения перерегулирования. Результат такой оптимизации показан в виде графиков переходных процессов на Рис. 12–Рис. 14.

Например, при выборе весового коэффициента, равного 10000, перерегулирование при обработке скачка снижается до 40 %. Время затухания переходного процесса при обработке обоих видов воздействий составляет приблизительно 100 с. Соответствующие процессы показаны на рис.

Например, при выборе весового коэффициента, равного 20000, перерегулирование при обработке скачка снижается до 25 %. Время затухания переходного процесса при обработке обоих видов воздействий составляет приблизительно 160 с. Дальнейшее увеличение весового коэффициента видится нецелесообразным, так как снижение перерегулирования

достигается ценой слишком большого увеличения длительности переходного процесса.

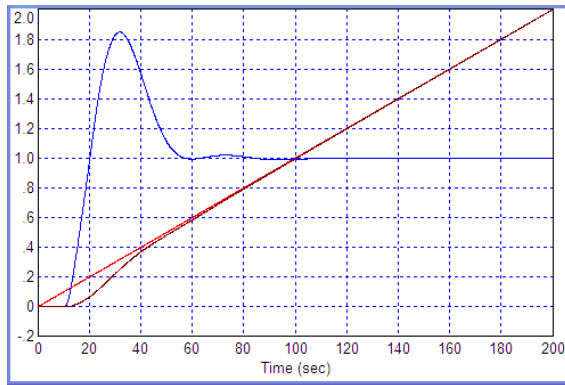


Рис. 12. Результат оптимизации с весовым коэффициентом 1000

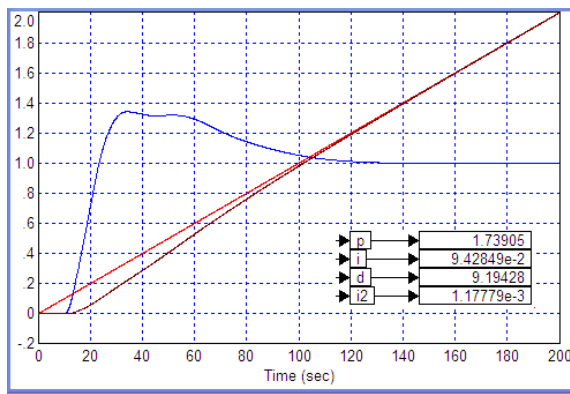


Рис. 13. Результат оптимизации с весовым коэффициентом 10 000

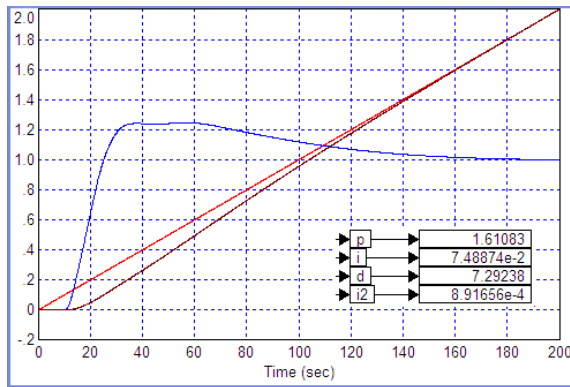


Рис. 14. Результат оптимизации с весовым коэффициентом 20 000

Вывод 3: Система с ПИ²Д-регулятором, оптимизированная по компромиссу между качеством обработки ступенчатого скачка и качеством обработки линейно нарастающего воздействия, обеспечивает требуемый компромисс, в итоге качество обработки обоих этих воздействий достаточно высоко.

6. ОБЪЕКТ, СКЛОННЫЙ К КОЛЕБАНИЯМ

Зададим модели объекта конкретные численные значения, например, следующие:

$$W(s) = \frac{\exp(-10s)}{(s+1)(s^2+0.01s+1)}. \quad (5)$$

Данный объект склонен к колебаниям. На Рис. 15 показан отклик такого объекта на ступенчатый скачок. Предложенная структура для оптимизации успешно решает даже задачу управления таким объектом. Действительно, результат оптимизации показан на рис. 13. Отклик системы на ступенчатый скачок имеет перерегулирование 30 %, длительность процесса составляет около 130 с.

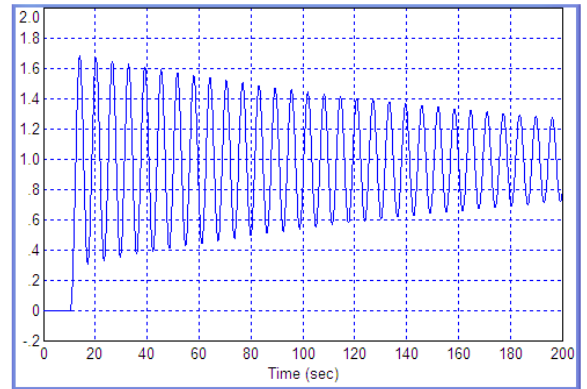


Рис. 15. Отклик объекта (5) на ступенчатый скачок

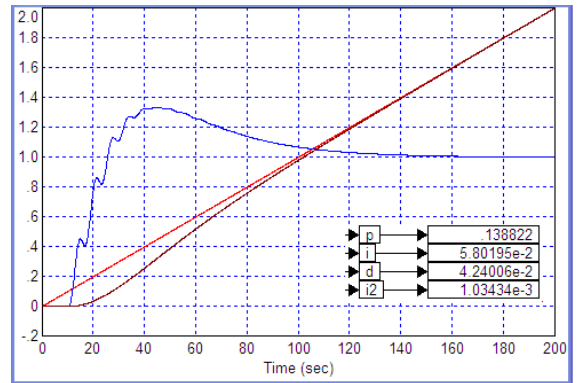


Рис. 16. Результат оптимизации системы с объектом (5) по структуре Рис. 11 с весовым коэффициентом 20 000

Вывод 4: Предложенная методика успешно работает с объектом, склонным к колебаниям.

7. АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ МЕТОД

Поскольку исследуемая система линейна, можно предполагать, что сумма откликов систем на два типа воздействий равна отклику системы на сумму этих воздействий. Осуществим оптимизацию последней системы для случая обработки сигнала, представляющего собой сумму ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия. Результат оптимизации показан на Рис. 17. Видно, что коэффициенты полученного регулятора (показаны на врезке графика) отличаются от коэффициентов, показанных на Рис. 13. На Рис. 18 показаны переходные процессы в этой системе в отклик на ступенчатый скачок и на

линейно нарастающее воздействие по отдельности. Видно, что ошибка в обоих случаях не затухает даже за 200 с. То есть полученная система существенно хуже.

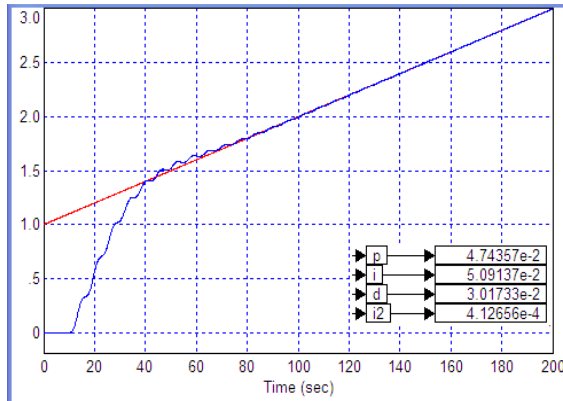


Рис. 17. Результат оптимизации системы по отклику на сумму ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия

Осуществим оптимизацию этой же системы для случая обработки сигнала, представляющего собой разность линейно нарастающего воздействия и ступенчатого скачка. Результат оптимизации показан на Рис. 19. Коэффициенты полученного регулятора вновь отличаются от коэффициентов, показанных на Рис. 15, но они более близки к коэффициентам на Рис. 13. На Рис. 20 показаны переходные процессы в этой системе в отклик на ступенчатый скачок и на линейно нарастающее воздействие по отдельности. Видно, что ошибка в обоих случаях затухает за 140 с. То есть полученная система соизмерима с системой, полученной при оптимизации двух систем совместно.

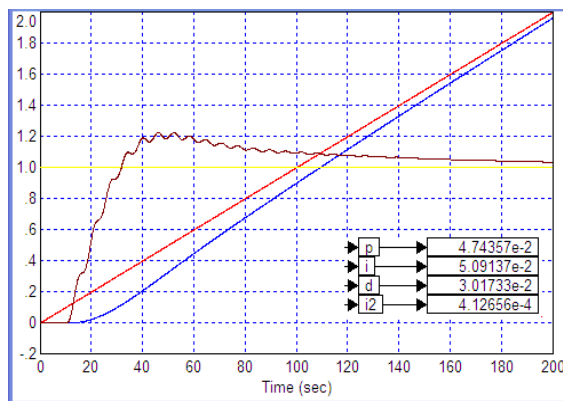


Рис. 18. Отклики системы по отдельности на ступенчатый скачок и на линейно нарастающее воздействие

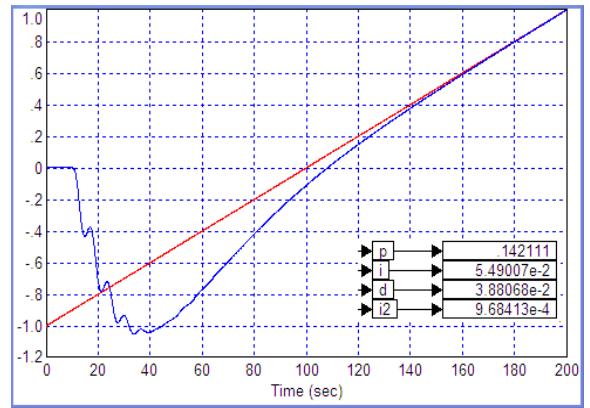


Рис. 19. Результат оптимизации системы по отклику на разность линейно нарастающего воздействия и ступенчатого скачка

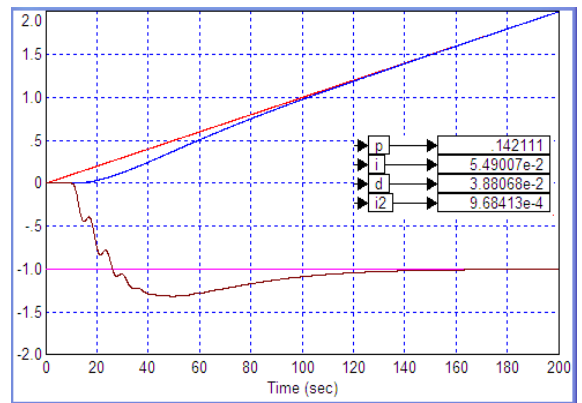


Рис. 20. Отклики системы по отдельности на ступенчатый скачок и на линейно нарастающее воздействие

Вывод 5: Альтернативная методика успешна только если используются воздействия, противоположные по знаку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье изучено влияние выбора тестового сигнала на результат оптимизации регулятора на примере ПИД и ПИ²Д структур. Показано, что если требуется качественная обработка линейно нарастающих сигналов, оптимизация системы только по сигналам указанного вида неэффективна. В этом случае полученная система характеризуется чрезмерно большим перерегулированием при обработке ступенчатых воздействий. Предложена методика для проектирования эффективной системы, состоящая в численной оптимизации регулятора для двух параллельно работающих систем, обрабатывающих различные по характеру воздействия. Данная методика может быть упрощена, если на единственную систему подавать при оптимизации линейную комбинацию этих воздействий с противоположными знаками. Если оба воздействия действуют в одном и том же направлении, такая упрощенная методика неэффективна.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, проект 2014/138, название проекта: “Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического регулирования. М.: Высш. Шк. 2006. 365 с.: ил.
- [2] Клиначёв Н. В. Теория систем автоматического регулирования и управления: Учеб.-метод. комплекс. Offline версия 3.6. Челябинск, 2005. см. также: URL: http://model.exponenta.ru/tau_lec.html.
- [3] Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384с.
- [4] Клиначев Н. В. VisSim в России; студенческая версия программы VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [5] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления в среде VisSim // Труды семинара по автоматике и программной инженерии, посвященного юбилею ОАО «Новосибирский институт программных систем» (ОАО «НИПС») 16.04.2012, Новосибирск, типогр. ЗАО «КАНТ». С.90–140. – с сайта http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [6] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [7] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, 2010 Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [8] Ишимцев Р.Ю., Жмудь В.А. Применение составных интегральных критериев для оптимизации регуляторов линейных объектов. Материалы IX международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-2008. Новосибирск, т.7, 2008. с. 151-154.
- [9] Воевода А. А., Жмудь В. А. Сходимость алгоритмов оптимизации регулятора для объекта с ограничителем и с запаздыванием // Научный вестник НГТУ. 2007. № 4 (29). С.179–184.
- [10] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для системы с обратной связью. Патент на изобретение РФ RU 2368933 С1. G05B 11/14. Оpubл.27.09.09. Бюл. № 27. Заявка № 2008110243, Правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [11] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для многомерного объекта. Патент на полезную модель РФ RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Оpubл.10.05.10. Бюл. № 27. Заявка № 2009138894/22 от 20.10.2009, правообладатель: ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет и Институт лазерной физики СО РАН.
- [12] Жмудь В. А., Семибаламут В. М., Воевода А. А. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. Патент на изобретение № 2457529. Приоритет от 11.01.2011. Заявка № 2011100407. Зарегистрировано 27.07.2012. Срок действия до 11.01.2031. Правообладатель: Учреждение РАН Институт лазерной физики Сибирского отделения (RU)
- [13] Жмудь В. А. Моделирование, исследование и оптимизация замкнутых систем автоматического управления. Новосибирск, Изд-во НГТУ, 2012. – 335 с.
- [14] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
- [15] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Основные ошибки при оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 47–61.
- [16] В.А. Жмудь, А.Н. Заворин, О.Д. Ядрышников. Неаналитические методы расчета ПИД-регуляторов. Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2013. – 40 с.
- [17] Пат. 2554291, МПК G01R 23/02, G01P 3/36. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью / В. А. Жмудь, А. Н. Заворин; НГТУ - 2014112628; заяв. 01.04.14; опуб. 27.06.15. – 9 с.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] The modeling tests of the new PID-regulators structures. Voevoda, A.A., Zhmud, V.A., Ishimsev, R.Y., Semibalamut, V.M. 2009. Proceedings of the IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling, ASM 2009. P.165 – 168.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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/>
- [24] 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.
- [25] 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>
- [26] 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.
- [27] 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/>
- [28] 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.
- [29] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2540461. Заявка № 2013145173, приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 19 декабря 2014 г. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 4.
- [30] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2541684. Заявка № 2013146115, приоритет от 15.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 15 января 2015 г. Срок действия патента истекает 25.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 5.
- [31] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2566339. Приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 20 октября 2015 г. Бюлл. № 29. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36.
- [32] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2584925. Приоритет от 05.03.15. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.04.16. Бюллетень № 14. Срок действия патента истекает 05.03.35. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [33] В.А. Жмудь, Заворин А. Н. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью. Патент на изобретение № 2554291. Приоритет от 01.04.14. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.06.15. Бюллетень № 18. Срок действия патента истекает 01.04.34. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [34] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Регулятор для систем с обратной связью. Патент РФ RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Опубл.27.09.08. Бюл. № 27. Заявка № 2008108410/22 от 04.03.2008, правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [35] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29.
- [36] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упредителя Смита. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 57–67.
- [37] STM32VLDISCOVERY – платформа для построения простой системы сбора данных. Лабораторная работа: учеб.-метод. пособие / В. А. Жмудь, В. Г. Трубин, А. В. Ескин, А. Л. Печников. – Новосибирск: Издательство НГТУ, 2014. – 174 с. – 50 экз. - ISBN 978-5-7782-2599-2.

Influence of the Type of the Test Signals onto the Result of the Numerical Optimization of Controllers

V. A. ZHMUD, I. L. REVA, L. V. DIMITROV

Abstract: Successful control of robototetical objects, as well as by any other mechanical and other devices often requires not only the achievement of a zero static error, i.e. an error of eliminating of the influence of constant noise, but also the zero dynamic error in suppressing of the ramp change of the prescribed value or the disturbansy. Traditionally, it is believed that if the system successfully fulfills the job step, it is equally successfully fulfills all other kinds of jobs, because the latter can be represented as the sum of an infinite number of infinitely small step jumps. In practice this is not so. If the system is qualitatively fulfills the jump, then at working with linearly rising influence a constant in magnitude error can occur in the system. To suppress this error an extra integrator in the regulator is required. If step jump is supplied in the input as the test signal, then the numerical optimization will not lead to the correct calculation of the coefficient of the double integration link in the result of the optimization procedure. If, however, ramp signal is used as the test one, then the resulting system will have excessive overshoot when developing step changing of the prescribed value or disturbance. In the paper, the first time the technique to solve this problem by numerical optimization of the controller is used in the simulation at the same time of the two systems, one of which is using a stepped input signal and the other – a linearly increasing one (ramp signal).

Key words: management, closed circuits, controls, design of control systems, digital control, feedback, optimization, astatism, PI controllers, PID, PI2D

REFERENCES

- [1] Vostrikov A. S., Francuzova G. A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. M.: Vyssh. Shk. 2006. 365 s.: il.
- [2] Klinachjov N. V. Teorija sistem avtomaticheskogo regulirovanija i upravljenija: Ucheb.-metod. kompleks. Offline versija 3.6. Cheljabinsk, 2005. sm. takzhe: URL: http://model.exponenta.ru/tau_lec.html.
- [3] D'jakonov V.P. VisSim+Mathcad+MATLAB.

- Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie. – M.: SOLON-Press, 2004. – 384s.
- [4] Klinachev N. V. VisSim v Rossii; studencheskaja versija programmy VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [5] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija v srede VisSim // Trudy seminarov po avtomatike i programmnoj inzhenerii, posvjashhennogo jubileju OAO «Novosibirskij institut programmyh sistem» (OAO «NIPS») 16.04.2012, Novosibirsk, tipogr. ZAO «KANT». S.90–140. – s sajta http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [6] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 c.
- [7] Zhmud V.A., Liapidevskiy A.V. The Design of the Feedback Systems by Means of the Modeling and Optimization in the Program VisSim 5.6/6.0 // Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, 2010 Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [8] Ishimcev R.Ju., Zhmud' V.A. Primenenie sostavnyh integral'nyh kriteriev dlja optimizacii reguljatorov linejnyh ob#ektov. Materialy IX mezhdunarodnoj konferencii «Aktual'nye problemy jelektronnoho priborostroenija» APJeP-2008. Novosibirsk, t.7, 2008. s. 151-154.
- [9] Voevoda A. A., Zhmud' V. A. Shodimost' algoritmov optimizacii reguljatora dlja ob#ekta s ogranichitelem i s zapazdyvaniem // Nauchnyj vestnik NGTU. 2007. № 4 (29). S.179–184.
- [10] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie RF RU 2368933 S1. G05B 11/14. Opubl.27.09.09. Bjul. № 27. Zajavka № 2008110243, Pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [11] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja mnogomernogo ob#ekta. Patent na poleznuju model' RF RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.10.05.10. Bjul. № 27. Zajavka № 2009138894/22 ot 20.10.2009, pravoobladatel': GOU VPO Novosibirskij gosudarstvennyj tehnickij universitet i Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [12] Zhmud' V. A., Semibalamut V. M., Voevoda A. A. Adaptivnaja sistema dlja regulirovanija i stabilizacii fizicheskikh velichin. Patent na izobrenie № 2457529. Prioritet ot 11.01.2011. Zajavka № 2011100407. Zaregistrovano 27.07.2012. Srok dejstvija do 11.01.2031. Pravoobladatel': Uchrezhdenie RAN Institut lazernoj fiziki Sibirskogo otdelenija (RU)
- [13] Zhmud' V. A. Modelirovanie, issledovanie i optimizacija zamknutyh sistem avtomaticheskogo upravlenija. Novosibirsk, Izd-vo NGTU, 2012. – 335 s.
- [14] V.A. Zhmud', O.D. Jadrishnikov. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). S. 24–29.
- [15] V.A. Zhmud', L.V. Dimitrov. Osnovnye oshibki pri optimizacii reguljatorov dlja zamknutyh sistem upravlenija. FGBOU VO NGTU (Novosibirsk, Rossija), tehnickij univetsitet Sofii (Sofija, Bolgarija). Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2016. № 2 (16). S. 47–61.
- [16] V.A. Zhmud', A.N. Zavorin, O.D. Jadrishnikov. Neanaliticheskie metody rascheta PID-reguljatorov. Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2013. – 40 c.
- [17] Pat. 2554291, MPK G01R 23/02, G01P 3/36. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju / V. A. Zhmud', A. N. Zavorin; NGTU - 2014112628; zajav. 01.04.14; opub. 27.06.15. - 9 c.
- [18] V.A. Zhmud', A.N. Zavorin. Metod proektirovanija jenergosberegajushhijh reguljatorov dlja slozhnyh ob#ektov s chastichno neizvestnoj model'ju. V kn.: Problemy upravlenija i modelirovanija v slozhnyh sistemah. Trudy XVI Mezhdunarodnoj konferencii 30 ijunja – 03 ijulja 2014 g., Samara. Rossija. S. 557–567.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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/>
- [24] 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.
- [25] 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>
- [26] Zhmud' V.A. Dinamika mehatronnyh sistem: ucheb. posobie / V.A. Zhmud', G.A. Francuzova, A.S. Vostrikov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. – 176 s. ISBN 978-5-7782-2415-5.
- [27] 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/>
- [28] V.A. Zhmud', A.N. Zavorin. Metod proektirovanija jenergosberegajushhijh reguljatorov dlja slozhnyh ob#ektov s chastichno neizvestnoj model'ju. V kn.: Problemy upravlenija i modelirovanija v slozhnyh

- sistemah. Trudy XVI Mezhdunarodnoj konferencii 30 ijunja – 03 ijulja 2014 g., Samara. Rossija. S. 557–567.
- [29] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2540461. Zajavka № 2013145173, prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 19 dekabnja 2014 g. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 4.
- [30] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2541684. Zajavka № 2013146115, prioritet ot 15.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 15 janvarja 2015 g. Srok dejstvija patenta istekaet 25.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 5.
- [31] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2566339. Prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 20 oktjabnja 2015 g. Bjull. № 29. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36.
- [32] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2584925. Prioritet ot 05.03.15. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 27.04.16. Bjulleten' № 14. Srok dejstvija patenta istekaet 05.03.35. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [33] V.A. Zhmud', Zavorin A. N. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2554291. Prioritet ot 01.04.14. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 27.06.15. Bjulleten' № 18. Srok dejstvija patenta istekaet 01.04.34. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [34] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Reguljator dlja sistem s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.27.09.08. Bjul. № 27. Zajavka № 2008108410/22 ot 04.03.2008, pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [35] V.A. Zhmud', O.D. Jadrjshnikov. Chislennaja optimizacija PID-reguljatorov s ispol'zovaniem detektora pravil'nosti dvizhenija v celevoj funkcii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2013. № 1 (3). S. 24–29.
- [36] V.A. Zhmud', O.D. Jadrjshnikov. Optimizacija reguljatora dlja mnogokanal'nyh ob#ektov s razvitiem idei upreditelja Smita. Avtomatika i programmaja

inzhenerija. 2014. № 1 (7). S. 57–67.

- [37] STM32VLDISCOVERY – platforma dlja postroenija prostoju sistemy sbora dannyh. Laboratornaja rabota: ucheb.-metod. posobie / V. A. Zhmud', V. G. Trubin, A. V. Eskin, A. L. Pechnikov. - Novosibirsk: Izdatel'stvo NGTU, 2014. - 174 s. - 50 jezk. - ISBN 978-5-7782-2599-2.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, (Новосибирск, Россия), доктор технических наук, доцент, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий.

E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Любомир Ванков Димитров – проректор по международным связям, профессор машиностроительного факультета Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, Почетный доктор НГТУ, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).

E-mail: lyubomir.dimitrov@tu-sofia.bg



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

E-mail: reva@corp.nstu.ru

Обоснование применения сигналов сложной формы при численной оптимизации регуляторов для замкнутых систем управления

Вадим А. Жмудь¹, Любомир В. Димитров²

¹ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), ²Технический университет Софии (София, Болгария)

Аннотация: В предыдущей работе [1] рассмотрена проблема проектирования регулятора, обеспечивающего астатизм второго порядка. Показано, что если при численной оптимизации регулятора использовать в качестве тестовых сигналов ступенчатые скачки, то получаемая система неудовлетворительно обрабатывает линейно нарастающие сигналы, и наоборот, если использовать линейно нарастающие сигналы, получаемая система неудовлетворительно обрабатывает ступенчатые скачки. В работе предложен метод оптимизации с использованием двух параллельно работающих моделей систем с различными входными сигналами (ступенчатым и линейно нарастающим). Показано, что замена усреднения по времени не всегда приводит к требуемому результату, хотя этот метод в принципе работоспособен. Все же указанная замена была бы крайне полезной, если бы это было возможно и целесообразно, поскольку это позволило бы упростить схему моделирования за счет увеличения времени моделирования. Сложность схемы может оказаться решающим фактором, сдерживающим применение метода, поскольку программное обеспечение всегда обладает лишь ограниченными возможностями по одновременной реализации моделирования и оптимизации сложных структур со многими элементами и многими связями. Ограничение на время моделирования не столь критично, поскольку это всего лишь увеличивает время эксперимента по оптимизации регулятора. Если поставленная задача актуальна, то вероятно, что резерв времени на ее расчет отыскать намного проще, чем перейти на другое программное обеспечение и даже на более новую версию ранее используемого программного обеспечения. В данной статье исследуется возможность такой замены усреднения по множеству на усреднение по времени.

Ключевые слова: управление, замкнутые контуры, регуляторы, проектирование управляющих систем, цифровое управление, обратная связь, оптимизация

ВВЕДЕНИЕ

В работе [1] рассмотрена проблема управления объектами с астатизмом второго порядка. Отмечено, что численная оптимизация для расчета коэффициентов в этом случае характеризуется специфической особенностью. Эта особенность состоит в том, что если оптимизация делается при использовании линейно нарастающего сигнала, то полученная

система характеризуется недостаточно высоким качеством при отработке ступенчатого скачка. Это проявляется в большом перерегулировании, в частности, в рассмотренном примере оно составляет 180%. Если же система оптимизируется по отклику на ступенчатое воздействие, то полученная система плохо обрабатывает линейно нарастающее воздействие, что сказывается в существенной статической ошибке.

В этой же статье исследована возможность оптимизации системы в том случае, когда на вход системы подается сумма ступенчатого скачка и линейно нарастающего воздействия. Несмотря на то, что система линейна, оптимизация по сумме откликов двух систем дает не такие же результаты, как оптимизация по отклику системы на сумму указанных воздействий. Также оптимизация по сумме воздействий дает не такие результаты, как оптимизация по разности этих воздействий.

В научных исследованиях часто усреднение по множеству заменяют усреднением по времени. Эта концепция на практике позволяет существенно экономить объем аппаратной части экспериментальной установки, хотя и увеличивает длительность эксперимента. Если такой подход плодотворен при оптимизации, это потенциально могло бы упростить используемую модель для оптимизации за счет увеличения времени моделирования (и оптимизации).

Кроме того, такой подход может оказаться крайне эффективным для проектирования робастных регуляторов. Действительно, изменения модели объекта в ходе моделирования и оптимизации может оказаться структурно более простым, чем параллельное моделирование нескольких систем.

В данной статье исследуется возможность такой замены путем моделирования и оптимизации в программе *VisSim*.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИНСТРУМЕНТАРИЙ ДЛЯ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Пусть объект задан передаточной функцией. Требуется рассчитать регулятор, обеспечивающий качественную отработку не только ступенчатого скачка, но и линейно нарастающего воздействия. Требование качества

состоит в уменьшении насколько возможно величины ошибки и сокращении насколько возможно времени затухания ошибки до нуля или до пренебрежимо малой величины.

Для управления объектом ПИ²Д-регулятор, то есть регулятор, содержащий помимо пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего тракта также тракт с двойным инеторатором.

Предлагается численная оптимизация с помощью средств моделирования и оптимизации VisSim. Простейшая стоимостная функция для оптимизации имеет следующий вид [2–8]:

$$\Psi(T, e) = \Psi_1(T, e) + K_w \Psi_2(T, e). \quad (1)$$

$$\Psi_1(T, e) = \int_0^T |e(t)t| dt. \quad (2)$$

$$\Psi_2(T, e) = \int_0^T \max\{0, e(t) \frac{de(t)}{dt}\} dt. \quad (3)$$

Здесь $e(t)$ – ошибка управления, t – время с начала переходного процесса, T – момент окончания моделирования, K_w – весовой

коэффициент.

В частности, для показательного сравнения, целесообразно задать объект в виде следующей модели, исследованной в статье [1]:

$$W(s) = \frac{\exp(-10s)}{(s+1)(s^2+0.01s+1)}. \quad (4)$$

Модель объекта в программе VisSim показана на *рис. 1*, модель регулятора показана на *рис. 2*, модель всей системы показана на *рис. 3*.

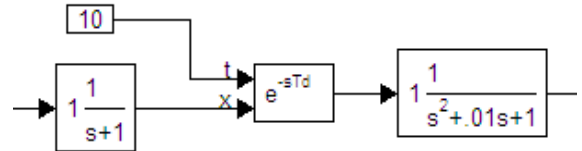


Рис. 1. Модель объекта управления

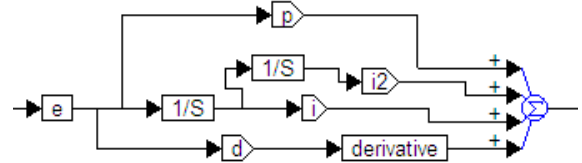


Рис. 2. Модель регулятора в системе управления

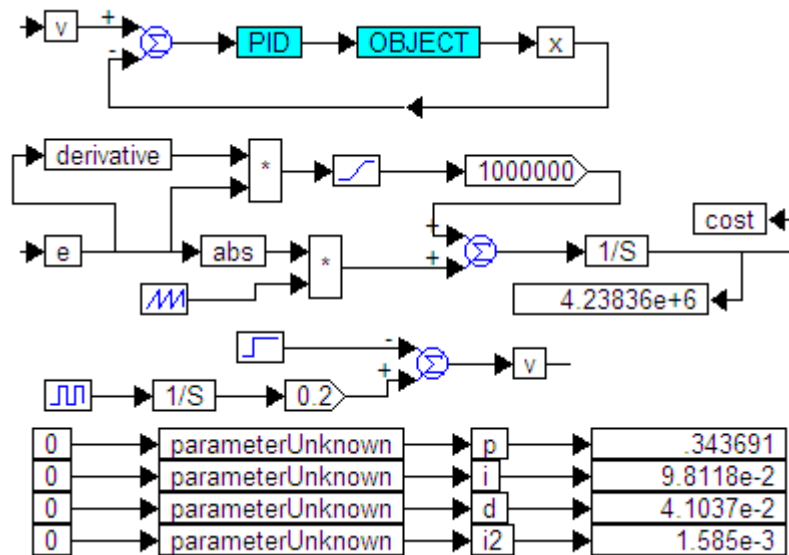


Рис. 3. Модель структуры для оптимизации регулятора в системе

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для отыскания компромиссного решения первоначально использовалась такая же структура модели, как в работе [1]. При этом вместо параллельного моделирования двух систем или параллельной подаче на одну систему двух воздействий, ступенчатого и линейно нарастающего, использовалась модель единственной системы. На ее вход подавались сдвинутые во времени два воздействия: ступенчатое (скачок в отрицательном направлении) и линейно нарастающее. При этом

использовался такой же весовой коэффициент, как в работе [1], а именно: $K_w = 20000$ и более. Увеличение этого коэффициента снижает перерегулирование в ответ на ступенчатый скачок, но увеличение статической ошибки при отработке линейно нарастающего воздействия. Пример полученного результата показан на *рис. 4*. Этот результат имеет три признака неудовлетворительного качества. В отклике на ступенчатый фрагмент скачка имеется нарастающая во времени ошибка (рост отклонения сигнала от предписанного уровня, равного минус единице). В отклике на линейно

нарастающий сигнал также видно нарастание ошибки по мере развития процесса. Также коэффициент второго интегратора отрицателен, хотя и мал по величине. Эти три признака указывают на то, что данный результат нельзя принять.

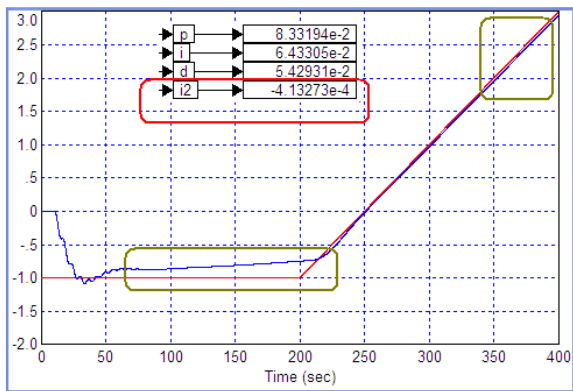


Рис. 4. Результат оптимизации регулятора по структуре рис. 3

Для решения этой проблемы увеличим в десять раз наклон линейно нарастающей части входного сигнала. Для этого множитель в формирователе линейно нарастающего сигнала увеличим до значения 0,2. Ранее он был взят равным 0,02 для получения такого же наклона, как в статье [1]. Для того чтобы сравнить полученный результат с предыдущим, сохраним полученные коэффициенты и осуществим простое моделирование (без оптимизации) при том же наклоне, какой был в первом варианте. Полученный график показан на рис. 5. Этот результат удовлетворителен. Все коэффициенты

положительны, ошибка в каждом случае асимптотически стремится к нулю. Тем не менее, в отклике на ступенчатый скачок присутствуют высокочастотные колебания, которые затухают недостаточно быстро.

Для дальнейших исследований используем существенно меньший весовой коэффициент, а именно: $K_w = 100$. Результат оптимизации показан на рис. 6. Значения полученных коэффициентов регулятора показаны на врезке к графику. Данные процессы можно считать хорошими: перерегулирование менее 15 %, высокочастотные колебания слабы и быстро затухают, статическая ошибка равна нулю, статическая ошибка второго порядка (ошибка при линейном нарастании входного сигнала) также равна нулю.

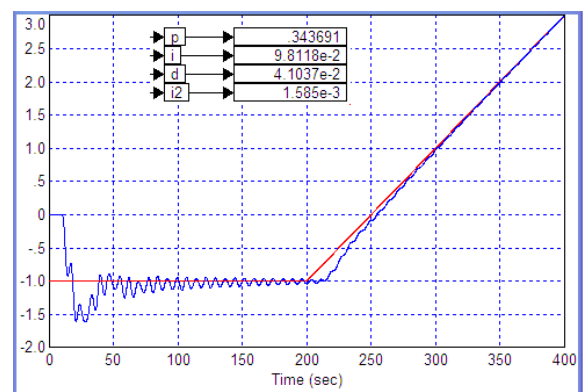


Рис. 5. Результат оптимизации регулятора по структуре рис. 3 с уточненными параметрами входных сигналов

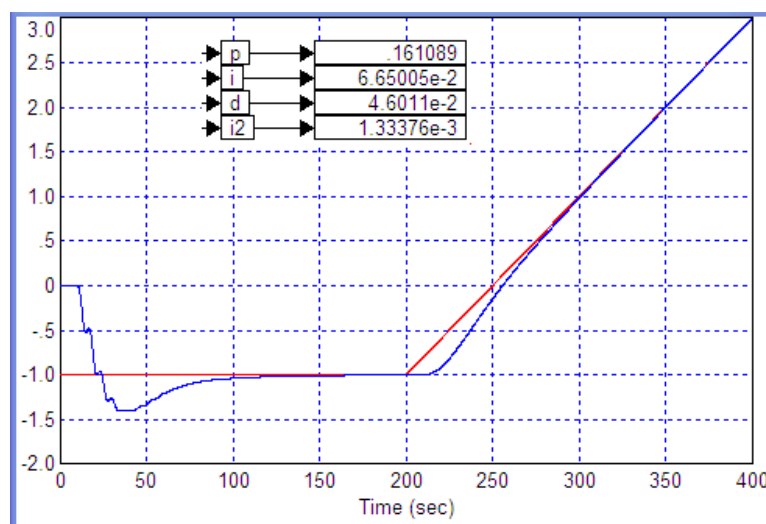


Рис. 6. Результат оптимизации регулятора по структуре рис. 3 с уменьшенным весовым коэффициентом $K_w = 100$

Таким образом, на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что замена усреднения по ансамблю систем на усреднение по времени эффективна в том случае, если речь идет о суперпозиции нескольких входных воздействий (заданий, помех) на

систему. При этом следует тщательно анализировать результат по критериям качества переходных процессов.

3. О ВОЗМОЖНОСТЯХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УСРЕДНЕНИЕМ ВО ВРЕМЕНИ

Рассмотренный подход было бы заманчиво распространить на решение задачи синтеза робастных систем. Суть этого подхода состоит в том, что если один из коэффициентов объекта изменяется в некоторых пределах, то можно моделировать параллельную работу двух систем, в которых регуляторы идентичны, а модели объектов взяты с крайними значениями данного коэффициента. Стоимостная функция в этом случае может быть вычислена как сумма стоимостных функций, вычисленных от ошибки в каждой системе в отдельности. В этом случае может быть получен регулятор, успешно управляющий объектами со всеми возможными значениями данного коэффициента.

Если таких коэффициентов несколько, то необходимо множество моделей систем, моделируемых параллельно. Например, для того, чтобы рассчитать объект, в котором два параметра заданы в некоторых интервалах, требуется в идеале использовать четыре параллельно работающие модели. Если таких параметров три, то необходимо восемь моделей, чтобы перебрать все возможные крайние значения всех коэффициентов. С ростом количества коэффициентов количество требуемых моделей растет как количество вершин n -мерного куба.

Если бы в ходе моделирования можно было изменять параметры объекта во некоторой схеме, то можно было бы использовать более простую схему моделирования, работающую большее время, чтобы осуществлять проектирование робастной системы.

Моделирование показало, что изменение коэффициентов объекта в ходе функционирования крайне затруднено. В частности, если использовать блок переменной `[value]`, задавая его значение извне, то, к сожалению, система использует то значение, которое данная величина имела к моменту начала моделирования. Изменяемую величину можно вводить путем блока умножения или путем использования ключей. Но такой подход требует сложной модели.

В целом следует заключить, что наиболее доступные версии программы VisSim к настоящему времени пока еще не достаточны для использования этого метода. Вместе с тем, если новейшие версии этой программы позволяют использовать существенно большее количество блоков при моделировании, то в этом случае такой подход не требуется. Кроме того, параллельное моделирование многих систем наиболее наглядно и проектирование такой системы не требует большого интеллектуального напряжения: в структуре всего лишь используется дублирование систем с заданием в них крайних значений параметров.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье исследована возможность использования усреднения во времени вместо усреднения по множеству.

Показано, что этот метод успешно работает при необходимости оптимизации системы для входных сигналов и (или) помех различного вида. Вместе с тем, отмечается, что исследования показали, что синтез робастных систем таким путем неэффективен. Моделирование нескольких систем, работающих параллельно, более эффективно.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, проект 2014/138, название проекта: “Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В.А. Жмудь, Л.В. Димитров. Влияние вида тестовых сигналов на результат численной оптимизации ПИД и ПИ2Д регуляторов. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), Технический университет Софии (София, Болгария). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 2 (16). С. 43–51.
- [2] Востриков А. С., Французова Г. А. Теория автоматического регулирования. М.: Высш. Шк. 2006. 365 с.: ил.
- [3] Клиначёв Н. В. Теория систем автоматического регулирования и управления: Учеб.-метод. комплекс. Offline версия 3.6. Челябинск, 2005. см. также: URL: http://model.exponenta.ru/tau_lec.html.
- [4] Дьяконов В.П. VisSim+Mathcad+MATLAB. Визуальное математическое моделирование. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 384с.
- [5] Клиначев Н. В. VisSim в России; студенческая версия программы VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [6] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления в среде VisSim // Труды семинара по автоматике и программной инженерии, посвященного юбилею ОАО «Новосибирский институт программных систем» (ОАО «НИПС») 16.04.2012, Новосибирск, типогр. ЗАО «КАНТ». С.90–140. – с сайта http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [7] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / Новосибир. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [8] 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.

Basis for the Use of Complex Form Signals in Numerical Optimization of Controllers for Closed-Loop Systems

V. A. ZHMUD, L. V. DIMITROV

Abstract: In a previous paper [1] the problem of designing the controller, providing astatism second order. It is shown that if used as a test signal step jump, the resulting system is satisfactorily fulfills ramp signals, and vice versa, if you use the ramp signals are received by the system unsatisfactory otrabotyvaet step jumps in numerical optimization controller. The paper presents the optimization method using two parallel operating system models with different input signals (step and ramp). It has been shown that replacement time averaging does not always lead to the desired result, although in principle this method operational. Yet this substitution would be very useful if it was possible and appropriate, as this would simplify the modeling scheme by increasing the simulation time. The complexity of the scheme may be the deciding factor, limiting the use of the method, because the software always has only limited capacity for simultaneous realization of simulation and optimization of complex structures with many elements and many links. Restriction on the simulation time is not as critical as it only increases the duration of the experiment to optimize the regulator. If the assigned task is urgent, it is likely that a reserve of time to find its calculation is much easier than to go to other software, and even a newer version of the previously used software. This article explores the possibility of such a replacement on the set ustredneniya on an average over time.

Key words: management, closed circuits, controls, design of control systems, digital control, feedback, optimization

REFERENCES

- [1] V.A. Zhmud', L.V. Dimitrov. Vlijanie vida testovyh signalov na rezul'tat chislennoj optimizacii PID i PI2D reguljatorov. FGBOU VO NGTU (Novosibirsk, Rossija), Tehniceskij universitet Sofii (Sofija, Bolgarija). Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2016. № 2 (16). S. 43–51.
- [2] Vostrikov A. S., Francuzova G. A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija. M.: Vyssh. Shk. 2006. 365 s.: il.
- [3] Klinachjov N. V. Teorija sistem avtomaticheskogo

regulirovanija i upravlenija: Ucheb.-metod. kompleks. Offline versija 3.6. Cheljabinsk, 2005. sm. takzhe: URL: http://model.exponenta.ru/tau_lect.html.

- [4] D'jakonov V.P. VisSim+Mathcad+MATLAB. Vizual'noe matematicheskoe modelirovanie. – M.: SOLON-Press, 2004. – 384s.
- [5] Klinachev N. V. VisSim v Rossii; studencheskaja versija programmy VisSim. URL: <http://www.vissim.nm.ru/download.html>.
- [6] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija v srede VisSim // Trudy seminarov po avtomatike i programmnoj inzhenerii, posvjashhenogo jubileju OAO «Novosibirskij institut programmnyh sistem» (OAO «NIPS») 16.04.2012, Novosibirsk, tipogr. ZAO «KANT». S.90–140. – s sajta http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [7] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 s.
- [8] Zhmud' V.A. Dinamika mehatronnyh sistem: ucheb. posobie / V.A. Zhmud', G.A. Francuzova, A.S. Vostrikov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. – 176 s. ISBN 978-5-7782-2415-5.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, (Новосибирск, Россия), доктор технических наук, доцент, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий.
E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Любомир Ванков Димитров – проректор по международным связям, профессор машиностроительного факультета Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, Почетный доктор НГТУ, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).
E-mail: lubomir_dimitrov@tu-sofia.bg

Новый подход к задаче проектирования робастных регуляторов

Вадим А. Жмудь¹, Иван Л. Рева¹, Любомир В. Димитров²

¹ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия), ²Технический университет Софии (София, Болгария)

Аннотация: Проектирование робастных систем управления обратной связи с помощью численного метода оптимизации, в основном, осуществляется с моделированием нескольких систем одновременно. В каждой такой системе регуляторы идентичны, но модели объектов различны. Эти модели включают в себя все крайние значения из возможных вариантов параметров модели объекта. В этом случае далеко не все возможные наборы параметров модели учитываются. Следовательно, регулятор может быть не надежным, т. е. он может не обеспечить устойчивость работы системы в некоторых случаях, которые не были проверены во время процедуры оптимизации. В данной статье предлагается альтернативный метод. Он состоит в последовательном изменении всех параметров в соответствии с гармоническим законом низкой частоты. Если параметров несколько, то частоты изменения каждого параметра некратны. Это обеспечивает полное покрытие пространства параметров. Полнота покрытия контролируется рассмотрением траекторий изменений параметров в фазовой плоскости. Показано, что метод эффективен, по меньшей мере, для объекта в виде фильтра третьего порядка.

Ключевые слова: система автоматического управления, численная оптимизация, регулятор, робастные системы, моделирование

ВВЕДЕНИЕ

Методы проектирования регуляторов актуальны, поскольку автоматическое управление применяется практически во всех отраслях науки, техники и технологии [1–5]. Для наиболее сложных объектов далеко не все методы применимы, но метод численной оптимизации может быть применен для объектов практически любой сложности, при условии, что программа моделирования справляется с этой моделью [1–2], там, где остальные методы не работают в принципе.

Задача проектирования робастного регулятора для объекта с интервально заданными параметрами рассматривается крайне редко.

Рассмотрим задачу управления объектом, модель которого задана передаточной функцией, коэффициенты которой могут изменяться в некотором интервале.

Как правило, такие задачи решаются проектированием адаптивных или робастных регуляторов.

Адаптивные регуляторы должны изменять свои параметры так, чтобы система оставалась устойчивой. Для этого необходимо осуществлять определение модели объекта в ходе его функционирования, что зачастую весьма сложно. Робастные регуляторы – это регуляторы, которые обеспечивают приемлемое качество управления объектом при всех возможных сочетаниях значений коэффициентов его модели.

Один из методов проектирования робастных регуляторов состоит в численной оптимизации регулятора при одновременном моделировании нескольких систем, в каждой из которых параметры модели объекта отличаются, а регуляторы идентичны. Например, если в модели объекта изменяется единственный параметр, то для оптимизации регулятора одновременно моделируются две системы, содержащие два объекта с крайними значениями этого параметра. Если в объекте изменяются два параметра, требуется одновременное моделирование четырех систем. Если же в объекте изменяются три параметра, требуется одновременное моделирование восьми систем. С ростом количества коэффициентов количество требуемых моделей растет как количество вершин n -мерного куба.

При этом исследуется лишь поведение системы, в которой все параметры объекта имеют крайние значения. Нельзя исключить, что сочетание каких-либо промежуточных значений параметров объекта могут оказаться наименее благоприятными, и при этих значениях система потеряет устойчивость.

В данной статье рассматривается альтернативный способ численной оптимизации регулятора, который состоит в том, что моделируется лишь одна система, но при этом параметры объекта последовательно изменяются в пределах отведенных значений. В этом случае на систему подается периодически

изменяющееся задание, чтобы избежать статического режима.

Трудность этого подхода состоит в проблеме реализации модели объекта, в которой параметры изменяются во времени. Моделирование показало, что изменение коэффициентов объекта в ходе функционирования крайне затруднено. В частности, если использовать блок переменной «value», задавая его значение извне, то система использует то значение, которое данная величина имела к моменту начала моделирования. Изменяемую величину можно вводить путем блока умножения или путем использования ключей. Но такой подход требует сложной модели.

В целом следует заключить, что наиболее доступные версии программы *VisSim* к настоящему времени пока еще не достаточны для использования этого метода. Вместе с тем, если новейшие версии этой программы позволяют использовать существенно большее количество блоков при моделировании, то в этом случае такой подход не требуется.

Тем не менее, преимущество такого подхода состоит в том, что можно обследовать

$$x(p) = \frac{1}{p} \left\{ -a_n x + \frac{1}{p} \left[-a_{n-1} x + \dots + \frac{1}{p} (-a_1 x - b_1 u + b_0 \frac{u}{p}) \right] \right\} . \quad (2)$$

Это соотношение соответствует структуре с обратными связями. Такая структура более пригодна для моделирования с изменением значений ее отдельных параметров.

Модель (2) эквивалентна модели фильтра n -го порядка (1), но она удобней тем, что в ней параметры модели работают как коэффициенты усиления. Для моделирования изменяющихся коэффициентов усиления удобно использовать блок умножения. Далее зададим изменения каждого из параметров модели таким образом, чтобы они изменялись по гармоническому закону. При этом частоты их изменений должны быть некратными. На вход системы будем подавать серию прямоугольных импульсов. Каждый такой прямоугольный импульс породит собственный переходный процесс. Эти процессы будут отличаться, поскольку в каждый момент времени параметры модели будут изменяться. Далее запустим обычную

поведение системы не только при фиксированных значениях параметров, но и при их изменении в ходе функционирования, что дает возможность исследования большого количества сочетаний этих параметров.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Пусть объект задан передаточной функцией n -го порядка следующего вида

$$W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_0 + b_1 s}{1 + a_1 s + \dots + a_n s^n} . \quad (1)$$

Пусть параметры модели изменяются в следующем диапазоне: $a_1 \in [a_{1\min}, a_{1\max}]$, ...

$$a_n \in [a_{n\min}, a_{n\max}] .$$

Требуется спроектировать регулятор, обеспечивающий устойчивость замкнутой системы для всех значений в этом диапазоне параметров.

2. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Преобразуем модель объекта в следующее соотношение.

процедуру оптимизации. В результате получим значения коэффициентов регулятора, который обеспечивает приемлемую работу системы при всех тех значениях параметра регулятора, которые были реализованы в ходе процедуры оптимизации. Это дает основание считать, что система устойчива при всех значениях этих коэффициентов.

3. ЧИСЛЕННЫЙ ПРИМЕР И РЕЗУЛЬТАТЫ

Пусть объект задан передаточной функцией четвертого порядка следующего вида

$$W(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1 - s}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3 + a_4 s^4} . \quad (3)$$

Структурная схема для моделирования объекта с такой моделью по уравнению (3) показана на *Рис. 1*.

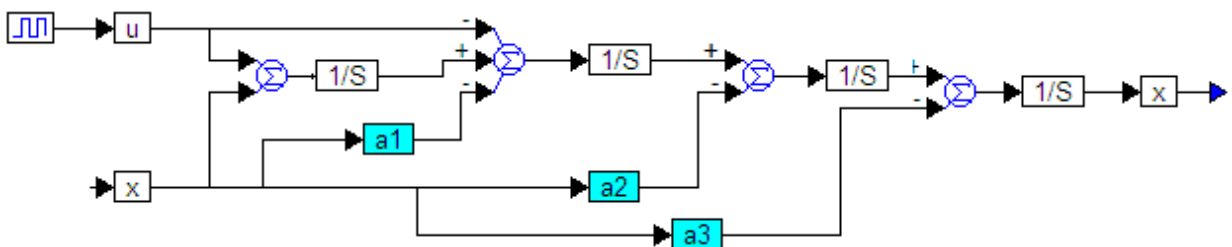


Рис. 1. Структура объекта в программе *VisSim*

Пусть параметры модели изменяются в следующем диапазоне: $a_1 \in [2, 8]$, $a_2 \in [3, 7]$ и $a_3 \in [3, 7]$.

Преобразуем модель объекта в следующее соотношение.

$$x(p) = \frac{1}{p} \left\{ -a_3 x + \frac{1}{p} \left[-a_2 x + \frac{1}{p} \left(-a_1 x - u + \frac{u}{p} \right) \right] \right\} \quad (4)$$

Для задания изменяющихся значений этих коэффициентов, можно использовать сумму среднего значения и гармонического приращения:

$$\begin{aligned} a_1 &= 5 + 3 \sin(\omega_1 + \varphi_1), \\ a_2 &= 5 + 2 \sin(\omega_2 + \varphi_2), \\ a_3 &= 5 + 2 \sin(\omega_3 + \varphi_3). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь частоты не кратны между собой, фазы могут быть выбраны с таким расчетом, чтобы фазовая траектория прошла крайние значения раньше всего. Варьирование частот позволяет выбрать скорость изменения этих параметров. Структура блока, формирующего первый параметр, показана на Рис. 2, остальные

структуры аналогичны. Структурная схема всей системы показана на Рис. 3.

В этой структурной схеме стоимостная функция вычисляется в соответствии со следующим соотношением:

$$\Psi[T, e(t)] = \int_0^T \{ \psi_1[e(t)] + 50\psi_2[e(t)] \} dt, \quad (6)$$

$$\psi_1[e(t)] = \max \left\{ 0, e(t) \frac{de(t)}{dt} \right\}, \quad (7)$$

$$\psi_2[e(t)] = |e(t)| R(t). \quad (8)$$

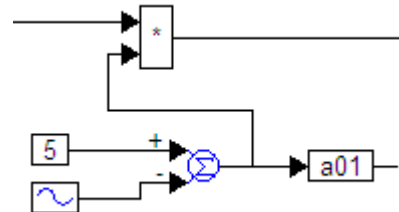


Рис. 2. Структура блока для формирования изменяющегося во времени параметра модели объекта a_{01} , другие аналогичные блоки идентичны

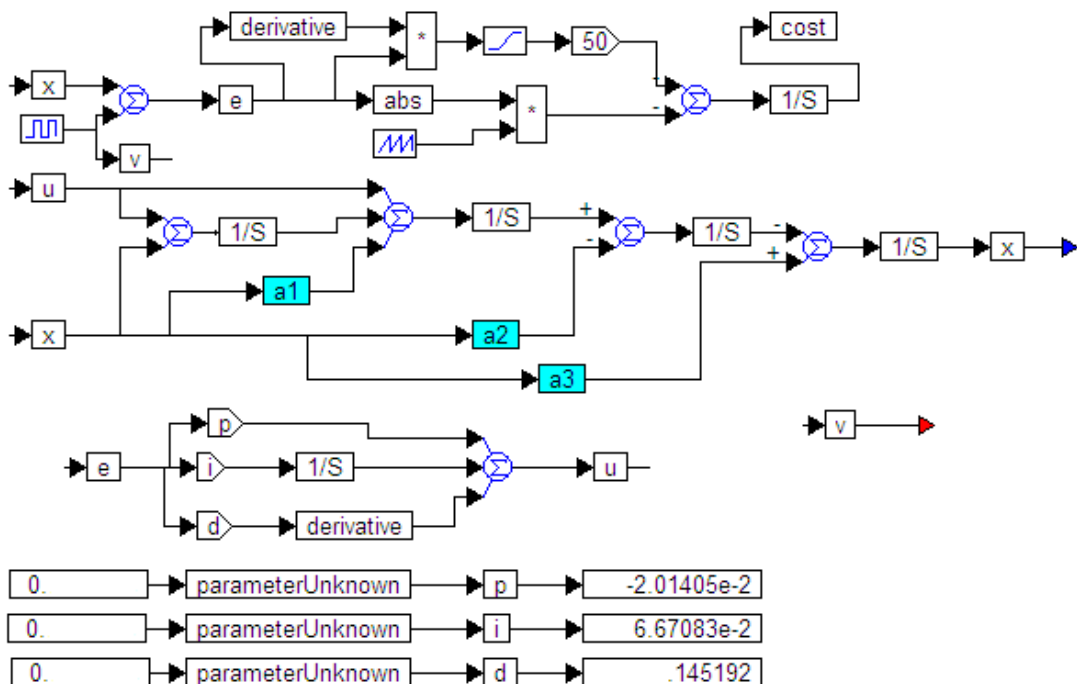


Рис. 3. Структура для оптимизации регулятора

Здесь $R(t)$ – пилообразный сигнал. Входной сигнал системы – прямоугольные импульсы, частота которой равна половине частоты пилообразного сигнала. Получаемые значения коэффициентов ПИД-регулятора показаны на индикаторах, на Рис. 3. Функции, отображающие изменения параметров модели объекта, показаны на фазовой плоскости на Рис. 4. По оси абсцисс показаны изменения коэффициента a_1 , по оси ординат изменения остальных

коэффициентов, синяя линия отображает значения коэффициента a_2 , черная линия соответствует коэффициенту a_3 . Видно, что значения параметров последовательно принимают самые различные значения, относительно равномерно покрывая всю область их допустимых значений. На Рис. 5 показаны отклики на прямоугольные импульсы на входе системы. Детально один из откликов показан на Рис. 6.

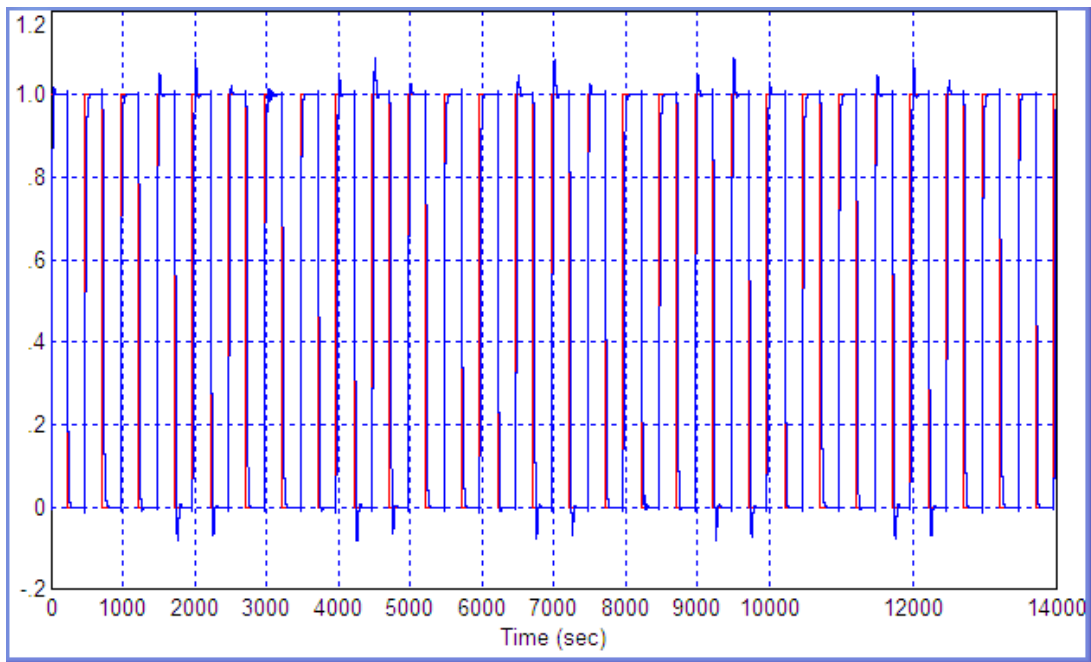


Рис. 4. Изменения коэффициентов модели объекта (1) в фазовой плоскости при моделировании и оптимизации: синяя линия – $a_2(a_1)$, черная линия – $a_3(a_1)$.

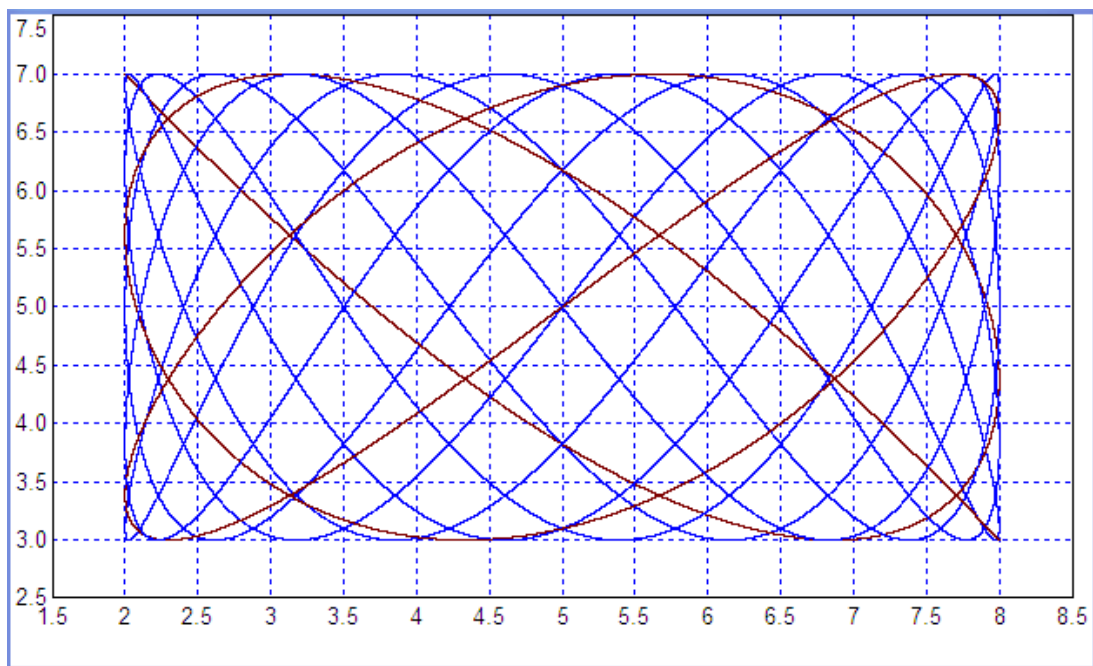


Рис. 5. Отклик в системе при найденных коэффициентах регулятора и при изменении параметров объекта в соответствии с Рис. 4.

4. ВОЗМОЖНЫЕ НЕДОСТАТКИ И ОГРАНИЧЕНИЯ ПРЕДЛОЖЕННОГО МЕТОДА

Возможные недостатки или слабые места предложенного метода могут состоять в следующем:

1. Основной недостаток этого метода состоит в том, что робастного регулятора для поставленной задачи может просто не существовать, и в этом случае задача не будет решена этим методом. Но в этом случае эта задача не будет решена и никаким другим

методом, поскольку параметры объекта изменяются в таком большом интервале, что никакой фиксированный регулятор не обеспечит устойчивость системы во всех случаях. Для этого случая необходим адаптивный регулятор. Поэтому такой случай не является недостатком метода, а относится к некорректной постановке задачи.

2. Все же не все возможные варианты сочетаний параметров объекта использованы при моделировании в ходе оптимизации. На Рис. 5 имеются белые пятна в пределах интересующей области коэффициентов.

Преодоление этого недостатка обеспечивается более длительным моделированием. Это потребует большего времени вычислений, но программа работы не станет более сложной.

3. Может оказаться, что, хотя параметры объекта в какой-то момент сочетаются с неблагоприятным эффектом, и устойчивость системы нарушается, но переходный процесс не успевает стать плохим, поскольку параметры все время изменяются, и неблагоприятное их сочетание быстро сменяется благоприятным сочетанием. Преодоление этого недостатка требует более медленного изменения парамет-

ров модели объекта в сравнении с длительностью переходного процесса. Это также приводит к увеличению времени моделирования и оптимизации, но не усложняет программу (проект) моделирования.

Таким образом, оба указанных недостатка могут быть преодолены за счет увеличения времени вычислений. Если решение задачи важно, то можно позволить себе дополнительную затрату времени, поскольку выигрышем является надежные робастные свойства системы.

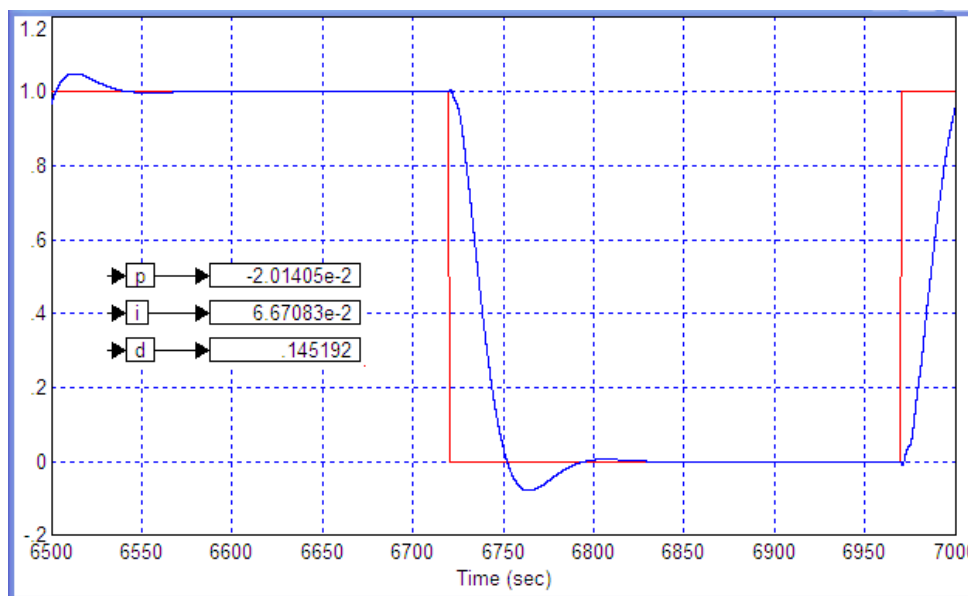


Рис. 6. Получаемый в системе переходный процесс (характерный)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, исследование показало, что предложенный метод проектирования робастного регулятора путем численной оптимизации при моделировании системы с объектом, параметры которого изменяются во времени по гармоническому закону (с некрратными частотами) дает, по меньшей мере, в некоторых случаях, искомый результат.

Естественно, расчет робастного регулятора возможен не во всех случаях, а только если параметры модели объекта изменяются в относительно небольшом диапазоне. Сочетание диапазонов параметров объекта может оказаться таким, что невозможно рассчитать регулятор, обеспечивающий устойчивость системы при любых возможных значениях параметров из этих диапазонов.

Если программа не справляется с задачей, интервал моделирования можно разбить на два, рассчитать регулятор для каждого случая, выделить проблемные сочетания параметров, запрограммировать изменения параметров так, чтобы все проблемные сочетания реализовывались на интервале моделирования и

осуществить окончательную численную оптимизацию регулятора.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ, проект 2014/138, название проекта: “Новые структуры, модели и алгоритмы для прорывных методов управления техническими системами на основе наукоемких результатов интеллектуальной деятельности”.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] V. A. Zhmud and A. V. Liapidevskiy. 2010 The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.6/6.0. Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [2] V. A. Zhmud and O. D. Yadrishnikov. 2013. 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. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. P. 265–270.
- [3] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления в среде VisSim // Труды семинара по автоматике и программной

инженерии, посвященного юбилею ОАО «Новосибирский институт программных систем» (ОАО «НИПС») 16.04.2012, Новосибирск, типогр. ЗАО «КАНТ». С.90–140. – с сайта http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/

- [4] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [5] 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.

New Approach to the Design of Robust Regulators

V. A. ZHMUD, I. L. REVA, L. V. DIMITROV

Abstract: The design of robust feedback systems by means of the numerical optimization method is mostly accomplished with modeling of the several systems simultaneously. In each such system regulators are similar. But the object models are different. It includes all edge values from the possible variants of the object model parameters. With all this not all possible sets of model parameters are taken into account. Hence regulator can be not robust, i. e. it can not provide system stability in some cases, which were not tested during the optimization procedure. The paper proposes alternative method. It consists in sequent changing of all parameters according harmonic law. The frequencies of changing of each parameter are aliquant. It provides full covering of the parameters space. The completeness of the coating is controlled by considering the trajectories of change in the phase plane of the parameters. It is shown that the method is effective at least for the object in the form of a third order filter.

Key words: automatic control system, numerical optimization, control, robust systems modeling

REFERENCES

- [1] V. A. Zhmud and A. V. Liapidevskiy. 2010 The design of the feedback systems by means of the modeling and optimization in the program VisSim 5.6/6.0. Proc. Of The 30th IASTED Conference on Modelling, Identification, and Control ~ AsiaMIC 2010 ~November 24–26, Phuket, Thailand. PP. 27–32.
- [2] V. A. Zhmud and O. D. Yadrishnikov. 2013. 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. Numerical optimization of PID-regulators using the improper moving detector in cost function. P. 265–270.

- [3] [6] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija v srede VisSim // Trudy seminarov po avtomatike i programmnoj inzhenerii, posvjashhenogo jubileju ОАО «Novosibirskij institut programmnyh sistem» (ОАО «NIPS») 16.04.2012, Novosibirsk, tipogr. ЗАО «KANT». S.90–140. – с сайта http://www.nips.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=140&Itemid=303/
- [4] [7] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 с.
- [5] [8] Zhmud' V.A. Dinamika mehatronnyh sistem: ucheb. posobie / V.A. Zhmud', G.A. Francuzova, A.S. Vostrikov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2014. – 176 s. ISBN 978-5-7782-2415-5.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, (Новосибирск, Россия), доктор технических наук, доцент, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий.
E-mail: zhmud@corp.nstu.ru



Любомир Ванков Димитров – проректор по международным связям, профессор машиностроительного факультета Технического университета Софии (София, Болгария), доктор наук, Почетный доктор НГТУ, автор более 200 научных статей. Область исследований: мехатроника, автоматика, микроэлектронные модули и системы и их применение (MEMS).
E-mail: lubomir.dimitrov@tu-sofia.bg



Иван Леонидович Рева – декан факультета Автоматики и вычислительной техники НГТУ, к.т.н. Основное направление научных исследований - защита речевой информации. Имеет более 20 публикаций
E-mail: reva@corp.nstu.ru

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

Содержание раздела:

- Н.А. Куликов. Разработка программы управления макетом химического реактора с использованием метода типовых регуляторов. ФГБОУ ВО НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 67–75.
- Д.Н. Катасонов. Система мобильного мониторинга сердечной деятельности человека: о применимости различных методов фильтрации электрокардиосигнала. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия) и ФГБУН ИАиЭ СО РАН (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 76–90.
- Ю.Е.Воскобойников, Д.А. Крысов. Выбор наилучшей двухпараметрической пороговой функции в алгоритмах вейвлет-фильтрации. ФГБОУ ВПО НГТУ, ФГБОУ ВПО НГАСУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 91–98.

Разработка программы управления макетом химического реактора с использованием метода типовых регуляторов

Куликов Н.А.

ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: В данной статье обсуждаются вопросы разработки алгоритма управления макетом химического реактора с использованием метода типовых регуляторов. Приводится описание основных функциональных элементов и возможностей стенда *Modicon ET722*, на котором реализована модель химического реактора. Разрабатывается алгоритм и управляющая программа в среде *Unity Pro XL*. Приводятся графики переходных процессов, протекающих в химическом реакторе.

Ключевые слова: алгоритм управления, химический реактор, типовой регулятор.

ВВЕДЕНИЕ

В современном мире при бурном развитии техники и промышленности, существует явно выраженная потребность к автоматизации не только отдельных объектов, процессов и операций, но и больших сложных комплексов, включающих в себя несколько относительно простых автоматизированных систем, взаимодействующих друг с другом.

Широкое распространение такого рода систем объясняется быстрым развитием техники регулирования и переходом от автоматизации отдельных операций к автоматизации крупных технологических комплексов.

Частным случаем таких систем являются системы автоматического регулирования нескольких взаимосвязанных величин. Такие системы называются многоканальными системами автоматического регулирования (*МСАР*) [1]. К *МСАР* относятся системы управления и регулирования, имеющие несколько регулируемых величин, что, в свою очередь, обуславливает наличие в таких системах нескольких контуров регулирования.

Необходимость автоматизации отдельного механизма или установки всегда наиболее очевидна. Она дает быстрый экономический эффект, улучшает качество производства, позволяет избежать тяжелой и рутинной работы. Современные системы автоматизации используют в своём составе программируемый логический контроллер (ПЛК). Это программно управляемый дискретный автомат, имеющий

некоторое множество входов, подключенных посредством датчиков к объекту управления и множеством выходов, подключенным к исполнительным устройствам.

ПЛК предназначен для работы в режиме реального времени в условиях промышленной среды и должен быть доступен для программирования неспециалистом в области информатики [2].

Современные ПЛК помимо простых логических операций способны выполнять цифровую обработку сигналов, управление приводами, регулирование, функции операторского управления и т.д.

Данная статья посвящена разработке алгоритма управления макетом химического реактора, который является двухканальным объектом управления, с использованием метода пропорционально – дифференциально – интегрального (ПИД) регулирования. Программная реализация алгоритма будет осуществлена в системе программирования *Unity Pro XL* [3-5] на одном из пяти входящих в её состав языков программирования *Functional Block Diagram (FBD)*. Разработанная программа будет загружена в ПЛК *Modicon M340* производства французского концерна *Schneider Electric*, который в данной задаче предназначен для управления работой учебного стенда *Modicon ET722*.

1. ОПИСАНИЕ УЧЕБНОГО СТЕНДА *MODICON ET722* И ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

1.1. Передняя панель учебного стенда

Учебный стенд *Modicon ET722* представляет собой модель сосуда, в котором протекает химическая реакция, и включает в себя системы управления уровнем заполнения продукта в сосуде и температурой продукта. В комбинации с функциями управления программируемого контроллера *Modicon M340*, возможно решать различные задачи обучения и разработки алгоритмов управления.

Фронтальная панель стенда *Modicon ET722* с основными функциональными элементами представлена на *Рис.1*.

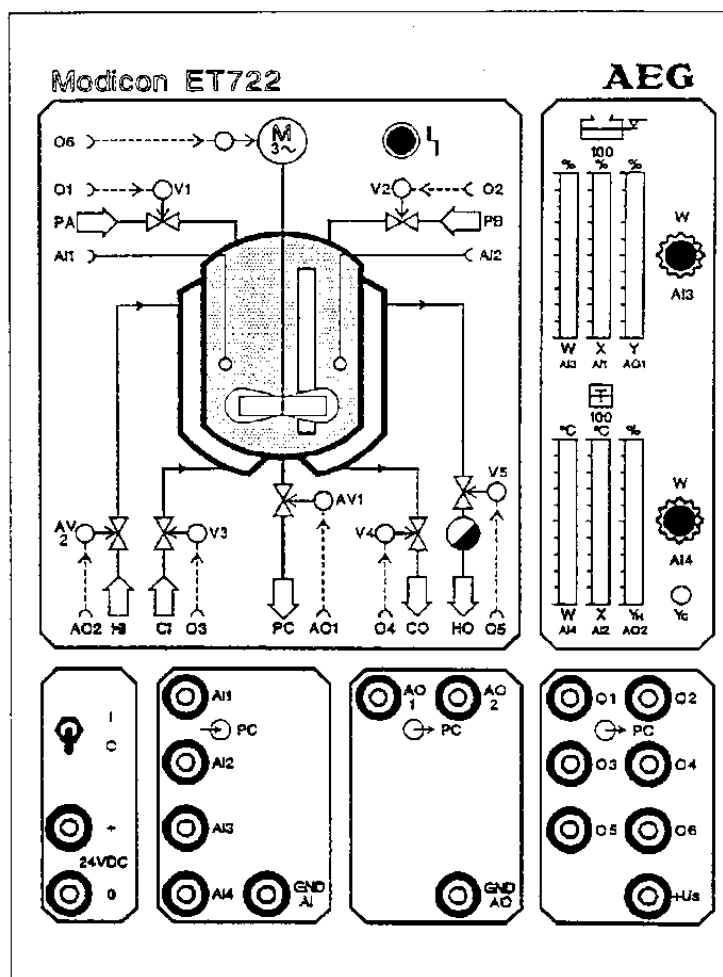


Рис.1. Фронтальная панель стенда Modicon ET722

1.2. Химический Сосуд

Химический сосуд оборудован двустенной оболочкой. В промежуток между стенками сосуда может подаваться нагревающая или охлаждающая среда. Внутри сосуда расположены следующие элементы:

- Датчик для измерения фактического значения уровня заполнения, "AI1" (Аналоговый входной сигнал №1). Текущее значение уровня представлено на двух дисплеях, на самом сосуде и в верхнем правом углу стенда, "X, AI1".

- Датчик для измерения фактического значения температуры продукта, "AI2". Текущее значение отображается в нижнем правом углу стенда, "X, AI2".

- Лопастной смеситель перемешивающего устройства. Когда перемешивающее устройство активно, на стенде сверху загорается зеленый светодиод. Перемешивающее устройство управляется двигателем "M" (Управляющий сигнал "O6").

1.3. Заполнение Сосуда

Сосуд заполняется двумя исходными продуктами через два дискретных клапана:

- Клапан "V1" (Управляющий сигнал "O1")

для подачи продукта А "PA".

- Клапан "V2" (Управляющий сигнал "O2") для подачи продукта В "PB".

Продукты А и В подаются с постоянной скоростью, но скорость заполнения продукта А несколько ниже скорости заполнения продукта В.

Зеленые сигнальные лампы "V1" и "V2" указывают на открытое состояние клапанов для впуска продуктов А и В. Сигнальные лампы в форме стрелок "PA" и "PB" загораются оранжевым цветом тогда, когда сосуд начинает заполняться продуктами А и В.

Кнопка обозначения активности клапана "V2", расположенная над сигнальной лампой, используется для моделирования возмущения. Эта кнопка позволяет открывать клапан "V2" вручную, независимо от управляющего сигнала "O2".

1.4. Сток из сосуда

Количество конечного продукта С, "PC", то есть сток из сосуда, регулируется аналоговым клапаном "AV1" (управляющий сигнал "AO1").

Угол открытия аналогового клапана "AV1" отображен через регулируемую переменную "Y, AO1" уровня заполнения и индицируется в

правом верхнем углу стенда *Modicon ET722*.

1.5. Нагревание

Аналоговый клапан "AV2" (сигнал управления "AO2") используется для непрерывного регулирования количества закачивания нагревающей среды "H".

Открытое состояние аналогового клапана "AV2" отображается через регулируемую переменную "Y_n, AO2" температуры и индицируется в правом нижнем углу стенда.

Уже небольшой угол открытия "AV2" приводит к тому, что загорается зеленая сигнальная лампа, индицирующая состояние клапана.

Подача нагревающей среды возможна только в том случае, если вместе с клапаном впуска "AV2" открыт дискретный клапан стока "V5" (Управляющий сигнал "O5").

Как только циркуляция нагревающей среды становится активной, загорается сигнальная лампа в форме стрелки "HF", одновременно с этим загорается сигнальная лампа отвода нагревающей среды из сосуда "HO".

Красная индикация внутри сосуда показывает, что идет процесс нагревания продукта реакции.

1.6. Охлаждение

Охлаждение продукта реакции осуществляется путем впуска среды "C1" через дискретный клапан "V3" (управляющий сигнал "O3").

Когда функция охлаждения активна, загорается зеленая сигнальная лампа, индицирующая открытое состояние клапана "V3".

Зеленая сигнальная лампа управляемой переменной охлаждающей среды "Yc", расположенная в нижнем правом углу стенда *Modicon ET722*, также индицирует открытое состояние клапана впуска "V3".

Подача охлаждающей среды возможна только в том случае, если вместе с дискретным клапаном впуска "V3" открыт дискретный клапан стока "V4" (управляющий сигнал "O4").

Оранжевая индикация внутри сосуда показывает, что идет процесс охлаждения продукта реакции.

1.7. Установка заданных значений уровня заполнения и температуры

Заданное значение уровня заполнения регулируется потенциометром "W, AI3" и отображается на одноименном линейном индикаторе. Заданное значение - аналоговое напряжение (0 V до +10 V) которое подается на разъем "AI3" в качестве аналогового входного сигнала для программируемого контроллера.

Заданное значение температуры регулируется потенциометром "W, AI4" и отображается на одноименном линейном индикаторе. Заданное значение - аналоговое

напряжение (0 V до 10 V), которое подается на разъем "AI4" в качестве аналогового входного сигнала для программируемого контроллера.

1.8. Постановка задачи и исходные данные

Обучающий стенд *Modicon ET722* позволяет регулировать две переменных: «Уровень заполнения» и «Температура продукта». Для управления этими переменными доступны следующие элементы:

- 2 аналоговых клапана;
- 5 дискретных клапанов;
- 1 перемешивающее устройство.

Фактические значения переменных измеряются двумя датчиками и отображаются на линейных индикаторах следующим образом:

- Уровень заполнения "X, AI1", в диапазоне значений: от 0 до 100%
- Температура "X, AI2", в диапазоне значений: от 0 до 100 градусов Цельсия.

Заданные значения "W, AI3" уровня заполнения и "W, AI4" температуры продукта, устанавливаемые двумя потенциометрами, отображаются при помощи соответствующих линейных индикаторов в том же самом диапазоне значений, как и фактические.

Линейные индикаторы на фронтальной панели обучающего стенда *Modicon ET 722* "Y, AO1" и "Y_n, AO2" индицируют степень открытия двух аналоговых клапанов в следующем диапазоне значений: от 0 до 100%.

Заполнение сосуда продуктами A и B происходит через два дискретных клапана "V1" и "V2", управляющий сигнал подается на входы "O1" и "O2". Клапан "V2" может быть открыт независимо от управляющего сигнала с входа "O2" с помощью кнопки расположенной над индикацией клапана. Нажатие кнопки моделирует возмущение, вносимое в процесс.

Сток конечного продукта C осуществляется через аналоговый клапан "AV1", управляющий сигнал подается на разъем "AO1". Вследствие того, что клапан "AV1" является аналоговым, существует возможность варьировать степень его открытия, в зависимости от управляющего сигнала.

Температура продуктов A и B также, как и температура среды в охлаждающей системе ("V3" и "V4") соответствует 5 градусам Цельсия.

Температура среды в нагревающей системе ("AV2", "V5") может изменяться от 5 до 100 градусов Цельсия.

Предельное значение температуры для конечного продукта C в сосуде может быть максимум 100 °C и минимум 5 °C.

В случае, если холодные продукты A или B добавляются к уже нагретому конечному продукту C, происходит снижение его температуры, согласно коэффициенту смешивания холодных и горячих субстанций сосуда. Данный процесс осуществляется,

исходя из предположения о том, что смешивание двух продуктов происходит немедленно и полностью, независимо от состояния перемешивающего устройства.

В стенде *Modicon ET722* функции нагрева или охлаждения прерываются на время открытия клапанов “V1” и “V2”. Нагрев продукта в сосуде возможен только в том случае, если совместно с активацией нагревающей среды происходит отвод тепла от сосуда.

Аналогично охлаждение продукта в сосуде возможно, если совместно с активацией охлаждающей среды происходит отвод этой среды от сосуда.

Когда функции нагрева или охлаждения деактивированы, сосуд осуществляет естественный теплообмен с окружающей средой, которая всегда активна. Влияние температуры окружающей среды активизируется сразу после включения стенда *Modicon ET722*.

Сформулируем задачи синтеза, которые будут решены в данной работе:

- Поддерживать количество продукта в сосуде на заданном уровне;
- Обеспечивать заданную температуру продукта в сосуде.

2. РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ UNITY НА ЯЗЫКЕ FBD

2.1. Разработка алгоритма работы управляющей программы

Любой алгоритм функционирования представляет собой простую и наглядную реализацию, на основе которой может быть

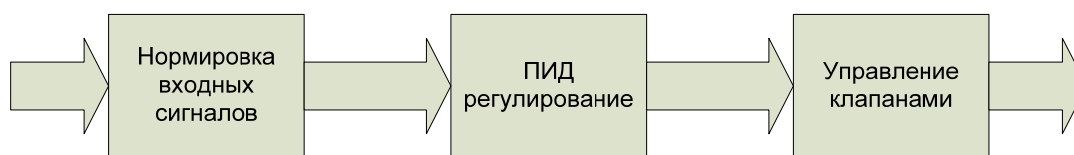


Рис. 3. Основные секции программы по функциональному назначению

выполнена программная реализация. Поэтому прежде чем приступить к написанию программы управления, необходимо разработать алгоритм, который бы позволил осуществлять правильную работу управления процессами в данной работе.

На Рис. 2. представлена функциональная схема замкнутой системы автоматического регулирования (САР) с ПИД - регулятором.

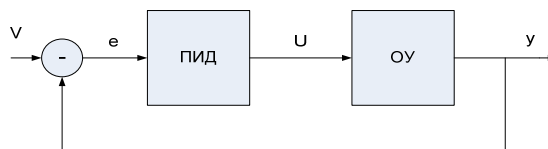


Рис.2. Функциональная схема замкнутой системы

Здесь V - входное воздействие, e - ошибка регулирования, U - управляющее воздействие, y - выходная переменная, ПИД - пропорционально - интегрально - дифференциальный регулятор, ОУ - объект управления;

Будущую программу условно можно разбить на три основные секция по функциональному назначению:

1. Секция нормировки входных сигналов.
2. ПИД-регулятор.
3. Секция управления клапанами сосуда.

Такое разбиение можно представить в виде схемы, которая показана на Рис. 3.

Листинг программы управления, написанной в системе программирования Unity *Pro XL* на языке *FBD*, представлен на Рис. 4.

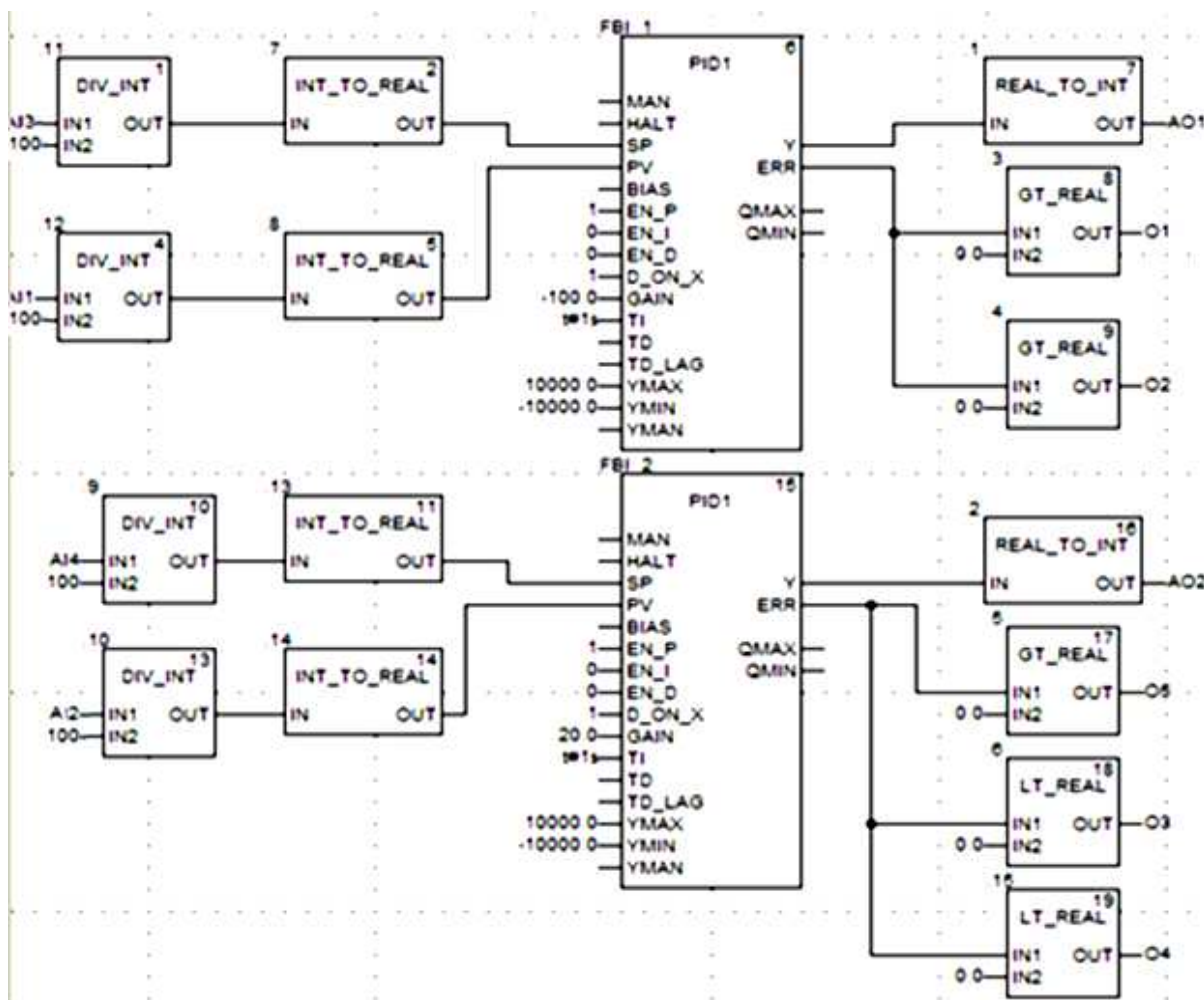


Рис. 4. Листинг программы на языке FBD

2.2. Блоки, входящие в схему нормировки входных сигналов

В данной программе для нормировки и приведению к понятному для ПИД-регулятора виду сигналов используется 4 блока *DIV_INT* и 4 блока *INT_TO_REAL*.

Блок *DIV_INT* (Рис. 5.) производит целочисленное деление значения входа(1) на значение входа(2). Тип данных *INTEGER*, для двух входов должен быть одинаков.

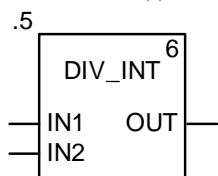


Рис.5. Блок *DIV_INT*

Блок *INT_TO_REAL* (Рис. 6) производит преобразование входной величины типа *INTEGER* (целое) в выходную величину типа *REAL* (число с плавающей запятой).

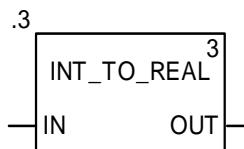


Рис.6. Блок *INT_TO_REAL*

2.3. ПИД – регулятор

Блок ПИД-регулятор. В данной программе используется два блока данного типа для регулирования уровня заполнения сосуда и температуры. Графическое изображение данного блока в программе представлено на Рис. 7.

Функциональный блок реализует ПИД-регулятор.

Ошибка системы *ERR* формируется как разница между заданным значением *SP* и переменной процесса *PV* и воздействует на управляемую переменную *Y*.

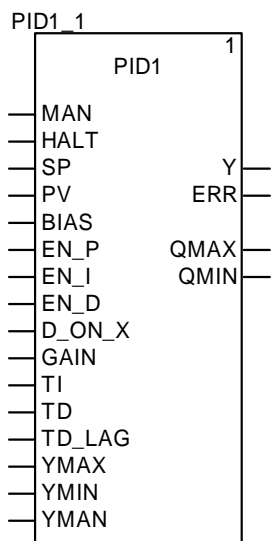


Рис. 7. Блок ПИД-регулятор

Параметризация функционального блока осуществляется заданием ПИД - параметров: коэффициента передачи *GAIN*, постоянной интегрирования *TI* и постоянной дифференцирования *TD*.

2.4. Блоки, входящие в схему управления клапанами сосуда

Блок *REAL_TO_INT* (Рис. 8.) производит преобразование входной величины типа *REAL* (число с плавающей запятой) в выходную величину типа *INTEGER* (целое).

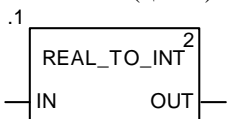


Рис.8. Блок *REAL_TO_INT*

Блок *GT_REAL* (Рис. 9.) производит логическое сравнение по «больше» двух входных величин типа *REAL* (число с плавающей запятой). Если значение на входе *IN1*

больше, чем значение на входе *IN2*, на выходе блока *OUT* формируется логическая единица. В данной программе используется 3 блока данного типа.

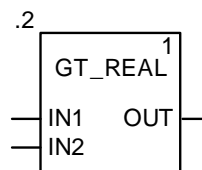


Рис. 9. Блок *GT_REAL*

Блок *LT_REAL* (Рис. 9) производит логическое сравнение по «меньше» двух входных величин типа *REAL* (число с плавающей запятой). Если значение на входе *IN1* меньше, чем значение на входе *IN2*, на выходе блока *OUT* формируется логическая единица. В данной программе используется 2 блока данного типа.

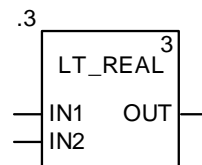


Рис. 10. Блок *LT_REAL*

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ УПРАВЛЯЮЩЕЙ ПРОГРАММЫ

Представленная на рис.4 программа, была загружена в ПЛК, после чего был осуществлен ее запуск. В результате были получены графики процессов, протекающих при работе химического сосуда.

3.1. Регулирование уровня смеси

На Рис. 11. представлено изменение заданного значения уровня заполнения смеси в сосуде (уставка, задаётся потенциометром "W, AI3").

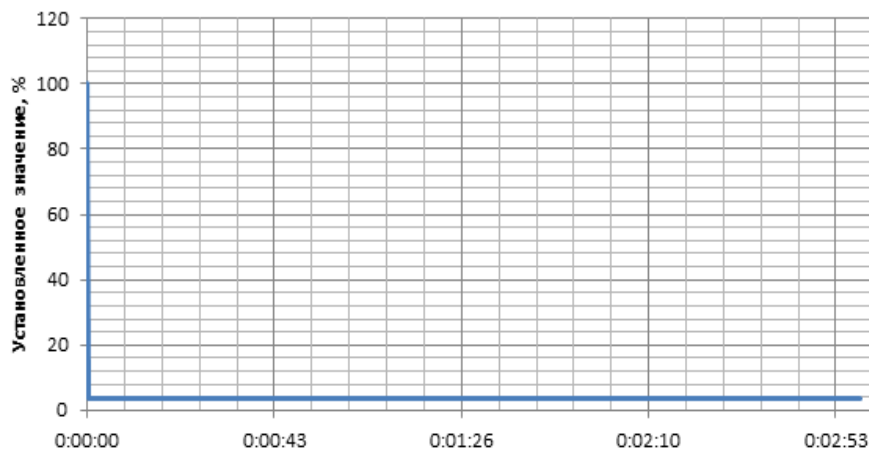


Рис.11. Заданное значение уровня заполнения

На *Рис. 12.* представлен переходный процесс по уровню заполнения сосуда, когда заданное значение изменилась с 90% до 3,5%.

Изначально уровень смеси в сосуде находился на отметке 90% от максимума, после установки требуемого уровня смеси на 3,5% произошло открытие клапанов стока и уровень

начал снижаться.

На *Рис. 13* представлен переходный процесс по управляющему воздействию, роль которого в данной системе выполняет уровень открытия аналогового клапана, регулирующего сток из сосуда.

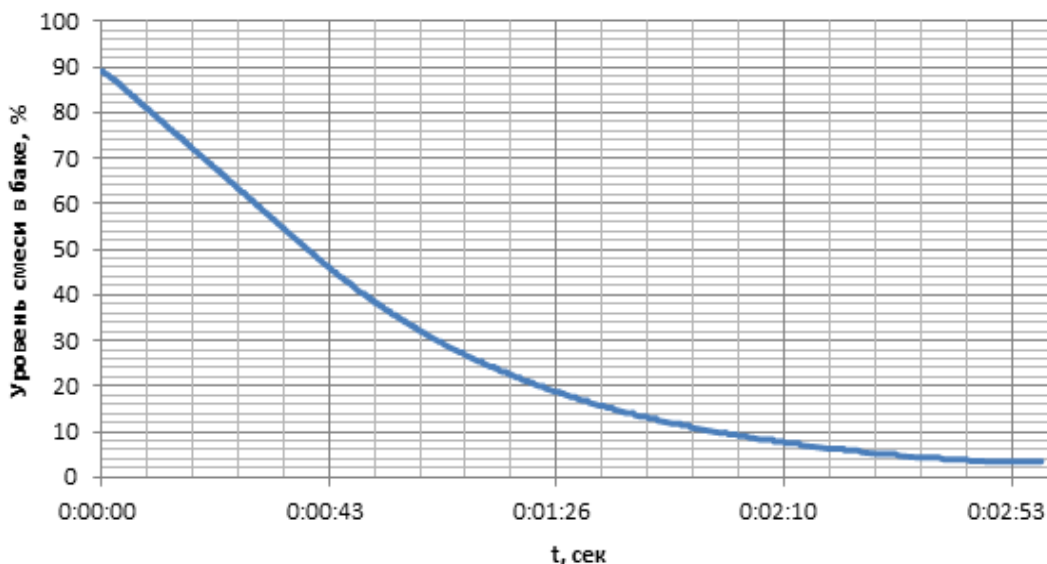


Рис. 12. Переходный процесс по уровню заполнения реактора

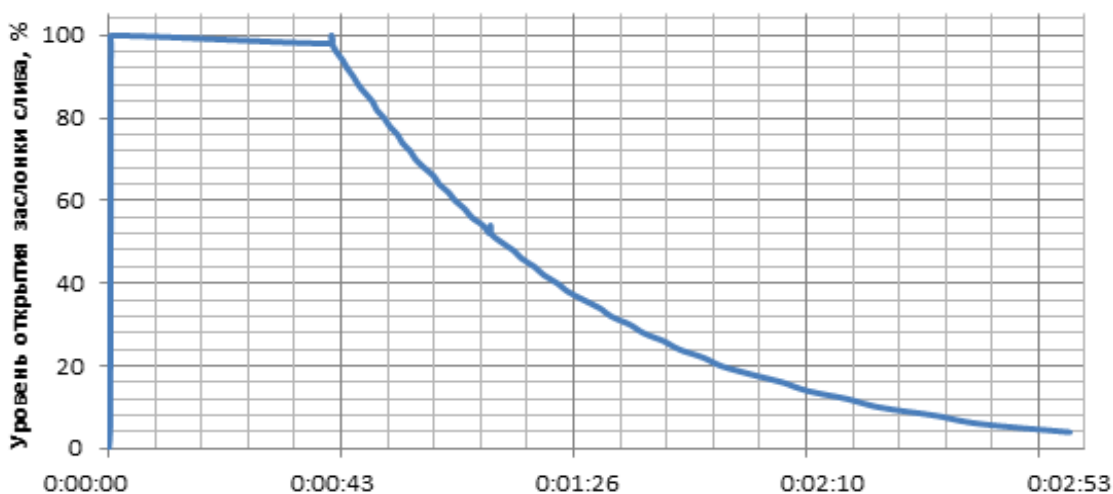


Рис. 13. Уровень открытия заслонки слива смеси

3.2. Регулирование температуры

На *Рис. 14* представлена зависимость установленного потенциометром "W, AI4" значения температуры от времени.

На *Рис. 15.* представлен переходный процесс по температуре смеси в сосуде при изменении заданного значения температуры с 5 до 53°C. После изменения заданного значения

температуры, открываются клапаны подачи нагревающей среды, и происходит нагрев смеси.

На *Рис. 16* представлен переходный процесс по управляющему воздействию, роль которого выполняет уровень открытия аналогового клапана, регулирующего подачу нагревающей среды.

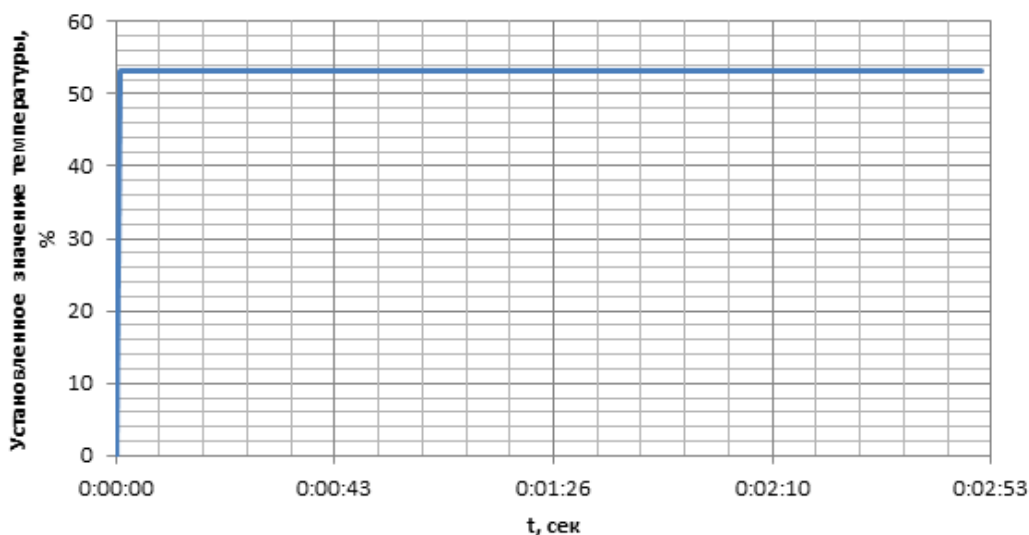


Рис. 14. Заданное значение температуры

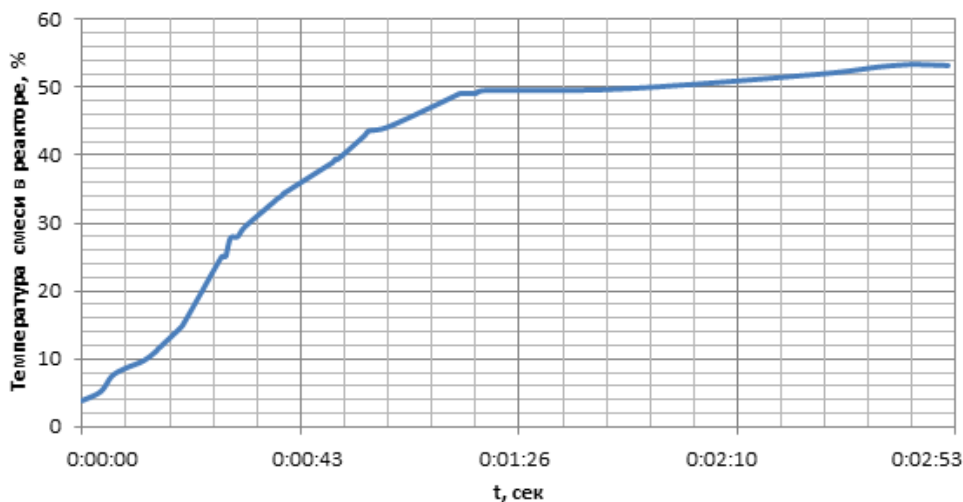


Рис. 15. Переходный процесс по температуре смеси в реакторе

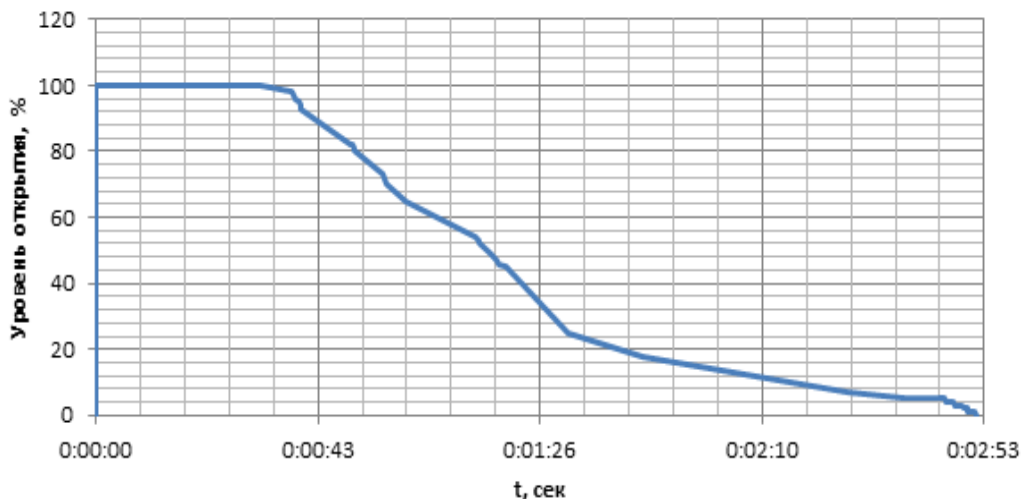


Рис. 16. Уровень открытия заслонки подачи нагревающей среды

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлены результаты разработки системы управления учебным стендом *Modicon ET722* производства *Schneider Electric*, на котором реализована модель

химического реактора. Выходными величинами, которые необходимо регулировать в данной системе, являлись температура и уровень смеси в реакторе. Разработана замкнутая система с двумя ПИД-регуляторами (один - в канале температуры, другой - в канале уровня

заполнения). Программа управления реализована на языке *FBD* системы программирования *Unity Pro XL*.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования: Учеб. пособие - Новосибирск, 2003.
- [2] Петров И.В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного программирования. – М Солон Пресс, 2004.
- [3] Суворов А.В., Медведков В.В., Саблина Г.В., Шахтшнейдер В.Г.. Программирование технологических контроллеров в среде Unity. – 2-е изд. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011.
- [4] ПЛК Modicon M340, программируемые с помощью ПО Unity Pro. Модули аналоговых входов-выходов. Руководство пользователя.- Schneider Electric, Ноябрь 2007.
- [5] ПЛК Modicon M340, программируемые с помощью ПО Unity Pro. Модули дискретных входов-выходов. Руководство пользователя.- Schneider Electric, Ноябрь 2007

Development of the Control Program of a Chemical Reactor Using the Standard Controls

N.A. KULIKOV

Abstract: This paper the development of a control system of a chemical reactor using the standard controls is discussed. A description of basic functional elements and possibilities of Modicon ET722 teaching stand is presented. A control program in Unity Pro XL software

environment is designed. Graphs of transients are presented.

Keywords: control system, chemical reactor, standard control.

REFERENCES

- [1] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Teorija avtomaticheskogo regulirovanija: Ucheb. posobie - Novosibirsk, 2003.
- [2] Petrov I.V. Programmiruemye kontrollery. Standartnye jazyki i priemy prikladnogo programmirovaniya. – M Solon Press, 2004.
- [3] Suvorov A.V., Medvedkov V.V., Sablina G.V., Shahtshnejder V.G.. Programmirovanie tehnologicheskikh kontrollerov v srede Unity. – 2-e izd. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011.
- [4] PLK Modicon M340, programmiruemye s pomoshh'ju PO Unity Pro. Moduli analogovyh vhodov-vyhodov. Rukovodstvo pol'zovatelja.- Schneider Electric, Nojabr' 2007.
- [5] PLK Modicon M340, programmiruemye s pomoshh'ju PO Unity Pro. Moduli diskretnyh vhodov-vyhodov. Rukovodstvo pol'zovatelja.- Schneider Electric, Nojabr' 2007



Николай Александрович Куликов - магистрант кафедры автоматике
E-mail: nikola3843@yandex.ru

Система мобильного мониторинга сердечной деятельности человека: о применимости различных методов фильтрации электрокардиосигнала

Д.Н. Катасонов
 ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия
 ФГБУН ИАиЭ СО РАН, Новосибирск, Россия

Аннотация. Рассматривается индивидуальная носимая система мобильного мониторинга сердечной деятельности человека, обладающая возможностью автоматизированного анализа получаемых данных. Выполнен сравнительный анализ подходов к фильтрации электрокардиосигнала по критерию достигаемого отношения сигнал-шум, ошибке фильтрации и вычислительной трудоемкости.

Ключевые слова: мобильный мониторинг, электрокардиосигнал, вейвлет-фильтрация, компенсация сетевой наводки, отношение сигнал-шум, ограничение спектра ЭКС.

ВВЕДЕНИЕ

Сердечнососудистые заболевания, являются распространенными и социально значимыми заболеваниями во всем мире [1]. На сегодняшний день одним из основных и доступных методов диагностики сердечно-сосудистой системы человека является метод электрофизиологической инструментальной диагностики, известный как электрокардиография. Данный метод заключается в регистрации и исследовании электрокардиограммы (ЭКГ) – графической интерпретации изменения разности потенциалов, называемой электрокардиосигналом (ЭКС), возникающей на поверхности возбуждаемой ткани, при распространении волны возбуждения по сердцу [1]. Одним из наиболее быстро развивающихся направлений инструментальной электрофизиологической диагностики состояния сердечно-сосудистой системы человека является непрерывное течение 24 часов или более, в условиях повседневной активности пациента мониторинг ЭКГ. Данный вид исследования также известен как Холтеровское мониторирование. Существующие системы длительного мониторинга обладают рядом недостатков. В применяемых в настоящее время системах длительного мониторинга, портативный регистратор соединяется проводами с регистрирующими электродами. Такой способ передачи регистрируемого ЭКС сопровождается необходимостью пациенту следить за состоянием и положением соединительных проводов и регистрирующих электродов вовремя мониторирования.

Кроме того, другим недостатком систем, применяющихся в настоящее время является, то что после окончания мониторинга, накопленные данные передаются на персональный компьютер, где при помощи специализированного программного обеспечения производится их дешифрация и анализ.

Г.М. Алдоным [8], Е. Jovanov [9], R. Fensli [10] проведены исследования различных аспектов длительного мониторинга с возможностью оперативного обмена данными с медицинским персоналом. В общем случае подобная система мониторинга состоит из датчиков ЭКГ, частоты пульса и других датчиков физиологического состояния, систему сбора, анализа данных и принятия решений (далее систему сбора данных), и коммуникатора (устройства сотовой связи), обеспечивающего оперативный обмен данными с медицинским персоналом. В Новосибирском институте Автоматики и электротри СО РАН в настоящее время ведется разработка системы мониторинга сердечной деятельности, обладающей возможностью оперативного обмена данными с медицинским персоналом. На Рис. 1 приведена структурная схема системы мониторинга.

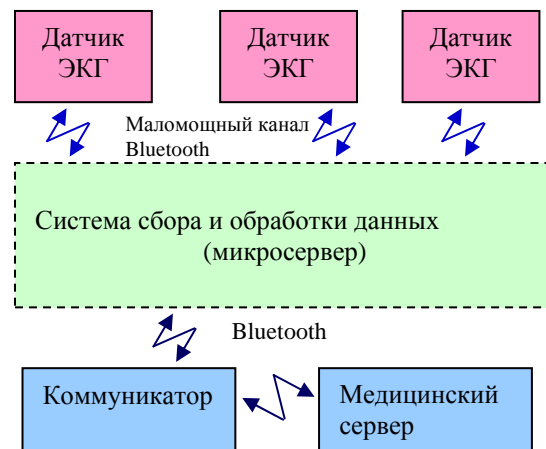


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой системы мониторинга

Система мониторинга состоит из датчиков ЭКГ соединенных по беспроводному каналу, при

помощи *Bluetooth LE* с устройством сбора данных (микросервером), которое в свою очередь также по беспроводному каналу соединено с коммуникатором (смартфоном) выполняющим обмен данными с медицинским сервером. В качестве датчика ЭКГ применен оригинальный беспроводной емкостной сенсор, аналоговая и схемотехническая часть которого разработана ведущим инженером ИАиЭ СО РАН В.В. Вилейко. Электропитание датчика обеспечивается батареей типа *CR 2032*, а в качестве устройства реализующего беспроводную связь и аналого-цифровое преобразование регистрируемого ЭКС применена *SoC CC 2540*.

При этом минимизация и снижение веса носимых пациентом элементов системы мониторинга приводит к ограничениям на энергопотребление вычислительных устройств, выполняющих обработку получаемых данных.

Следует отметить, что для обеспечения согласования необходимой частоты дискретизации сигнала и пропускной способности канала связи необходимо применение согласующего фильтра (для подавления алиасинга). На *Рис. 2* приведена временная диаграмма, отражающая процесс дискретизации ЭКС и процесса выполнения согласующей фильтрации.

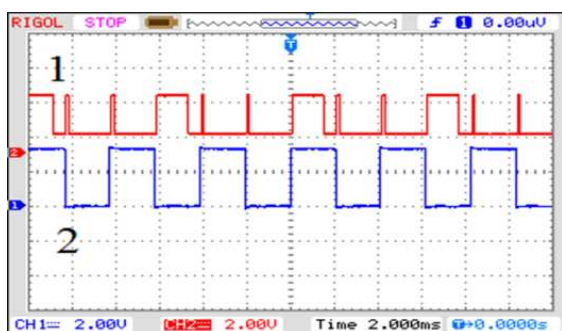


Рис. 2. Временная диаграмма процесса дискретизации ЭКС: кривая 1 отражает время обработки отсчета фильтром, кривая 2 отражает интервал дискретизации

На осциллограмме, приведенной на *Рис. 2* кривая 1 отражает состояния канала вывода микроконтроллера, время нахождения которого в логической единице соответствует времени обработки очередного отсчета фильтром. Кривая 2, представляет собой меандр и отражает процесс дискретизации сигнала – переход из состояния логической единицы в логический ноль и обратно соответствует получению очередного дискретного значения сигнала. Как видно из сравнения кривых приведенных на *Рис. 2*, обработка очередного отсчета сигнала завершается до получения последующего отсчета сигнала. При этом в качестве

согласующего фильтра была применена полифазная реализация фильтра Найквиста. Как видно из осциллограммы, приведенной на *Рис. 2*, время обработки дискретного отсчета ЭКС согласующим фильтром приближается к значению интервала дискретизации, что затрудняет дальнейшую обработку ЭКС вычислительными средствами датчика. Кроме того, примененная система 2540 не обладает достаточным запасом производительности и оперативной памяти для выполнения обработки текущего фрагмента ЭКС в процессе накопления последующего фрагмента. Все это приводит к необходимости выполнения обработки ЭКС вычислительными средствами системы сбора и обработки данных.

Регистрация ЭКС сопровождается действием разнотемповых возмущений, которые можно условно разделить на две группы – постоянно действующие помехи и возмущения длительность и темп изменения которых не известен. Основной причиной появления помех первого типа является действие наводки напряжения промышленной частоты, приводящей к появлению аддитивной составляющей в регистрируемом сигнале, амплитуда которой может быть выше амплитуды полезного сигнала, что приводит к потере диагностической ценности ЭКС. Причиной возмущений второго типа является движение регистрирующих электродов, вызванное дыханием и физической активностью пациента.

В настоящей работе будет рассмотрены подходы к снижению влияния помех первого типа – выполнению фильтрации ЭКС. Выявление и удаление участков, ЭКС искаженных в результате действия возмущение второго типа, рассматривается в ряде работ, среди которых можно выделить перспективные, на наш взгляд, подходы: применение анализа независимых компонент (*ICA*) и совместное применение методов машинного обучения и критериев оценки качества электрокардосигнала.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим краткое описание электрокардосигнала и сформулируем требования, некоторые требования к получаемому ЭКС, общий вид которого показан на *Рис. 3*.

На *Рис. 3* представлен типичный вид электрокардосигнала, полученного в первом стандартном отведении здорового человека, с нанесенными временной и амплитудной осями. Электрокардосигнал имеет квазипериодический характер и состоит из повторяющихся кардиокомплексов, общий вид которых приведен на *Рис. 4*.



Рис. 3. Общий вид электрокардиосигнала

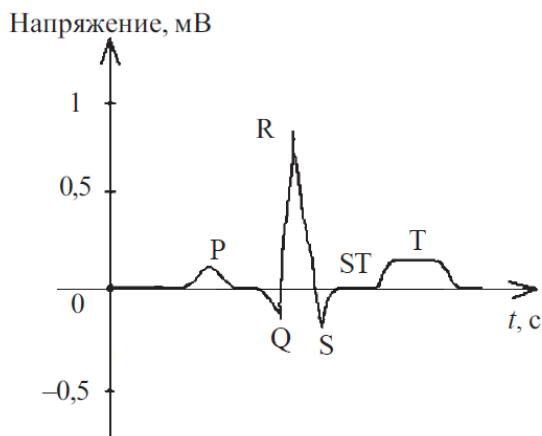


Рис. 4. Общий вид кардиокомплекса

Кардиокомплекс, вид которого показан на Рис. 4, принято разделять на 5 зубцов – P, Q, R, S, T, форма которых может значительно

варьироваться в зависимости от отведения в котором регистрируется ЭКС и в зависимости от состояния сердечно-сосудистой системы пациента. Амплитуда ЭКС находится в пределах 0.5–5 мВ, а наиболее значимая полоса частот находится в пределах 0.05–20 Гц [6]. При этом, для наибольшей диагностической ценности зарегистрированного сигнала необходима дифференциация всех фрагментов кардиокомплекса, в особенности фрагмента ST, позволяющего оценить наличие характер повреждений сердечной мышцы. В результате наличия помех первого типа, а в особенности действия наводки напряжения промышленной частоты, при визуализации сигнала возникают искажения, затрудняющие оценку формы, длительности и амплитуды фрагментов кардиокомплекса. Пример действия помех первого типа показан на Рис. 5.

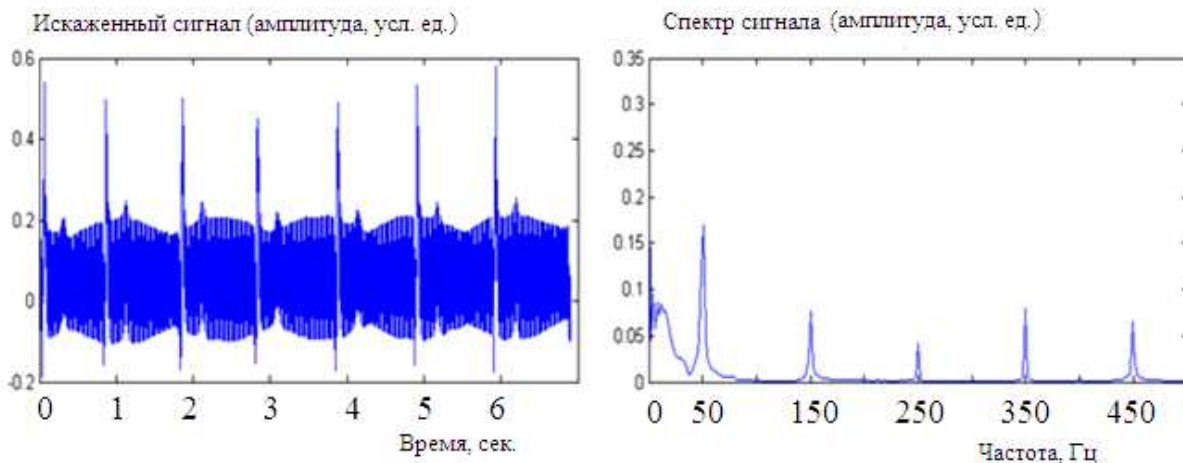


Рис. 5. Искаженный ЭКС и его спектр

Как видно из правой части Рис. 5, частотный спектр ЭКС помимо основных частот (0.05–20 Гц), частоты, наличие которых вызвано наводкой напряжения промышленной частоты и его высокочастотными гармониками. При этом, как видно из левой части Рис. 5, четкая дифференциация фрагментов кардиокомплексов невозможна.

Анализ литературы показал, что подходы к ограничению и коррекции частотного спектра

ЭКС можно разделить на две группы: 1) применение «классических» цифровых фильтров с фиксированной АЧХ, более подробно о которых будет сказано во второй главе настоящей работы; 2) применение фильтров с изменяемой в процессе работы АЧХ, к таким способам фильтрации относится пороговая обработка коэффициентов вейвлет-преобразования исходного ЭКС. При этом уровень искажений, вносимых в полезный сигнал в результате работы системы

фильтрации должен поддерживаться на уровне минимальном уровне, достаточном для дальнейшего анализа ЭКС. В настоящей работе оценка способов фильтрации будет произведена в соответствии с рекомендациями ГОСТ Р МЭК 60601-2-51-2008, регулирующим параметры стационарных электрокардиографических устройств. Также следует отметить, что требования к частотной полосе сигнала и вносимым в сигнал искажениям приведенные в данном ГОСТ являются более жесткими, по сравнению с аналогичными требованиями, приведенными в ГОСТ Р 50267.47-2004, регулирующем параметры суточных мониторов ЭКГ. В ГОСТ регулирующем параметры стационарных электрокардиографических устройств указано, что для сохранения диагностической значимости получаемого сигнала его полоса должна быть в пределах 0,05–150 Гц для сохранения диагностической значимости получаемого ЭКС. При этом в ГОСТ нет определенных требований к уровню затухания на частотах среза, следовательно, измерительный тракт должен обеспечивать подавление -3 дБ на частотах 0,05 и 150 Гц. Помимо данных требований, в рассматриваемом ГОСТ приведена методика испытаний электрокардиографических устройств, позволяющую оценить уровень искажений, вносимых в полезный сигнал, а также оценить адекватность воспроизведения различных компонент частотного спектра сигнала. Учитывая отсутствие прямых требований на параметры сигнала, например, на требуемое отношение сигнал-шум, и на параметры применяемых фильтров, нами было принято решение выполнить выбор способа фильтрации сигнала на основе достигаемого отношения сигнал-шум, уровне вносимых в сигнал искажений и применимость выбранного способа фильтрации с точки зрения испытаний, предложенных в ГОСТ. При этом реализация системы фильтрации сигнала вычислительными средствами, входящими в состав автономной системы мобильного мониторинга, накладывает ограничение на вычислительную трудоемкость применяемых алгоритмов. В результате чего при выборе способа фильтрации сигнала необходимо руководствоваться не только применимостью фильтра с точки зрения сохранения диагностической пригодности сигнала, но и с точки зрения требуемых вычислительных затрат на обработку участка сигнала фиксированной длины. Как показано в первой главе настоящей работы, одним из основных способов фильтрации сигнала, помимо применения цифровых БИХ и КИХ-фильтров, является применение пороговой обработки результата дискретного вейвлет преобразования ЭКС. Рассмотрим реализацию данных подходов, их вычислительную трудоемкость, достигаемое отношение сигнал-шум, вносимые в сигнал

искажения и их применимость с точки зрения испытаний, рассмотренных в ГОСТ.

2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТРУДОЕМКОСТИ АЛГОРИТМОВ ФИЛЬТРАЦИИ

Как показано выше основными способами фильтрации ЭКС является применение «классических» цифровых БИХ и КИХ фильтров и применение дискретного вейвлет преобразования. Одним из способов реализации цифрового фильтра является его представление в виде разностного уравнения вида:

$$y(n) = -\sum_{k=1}^N a(k)y(n-k) + \sum_{k=0}^M b(k)x(n-k), \quad (1)$$

где, $y(n)$ – отсчет сигнала на выходе фильтра, $x(n)$ – исходный сигнал, a , b – коэффициенты фильтра. Вычислительная сложность фильтрации при представлении фильтра в виде разностного уравнения определяется из выражения:

$$O_f = 2((L + l_e) \cdot (2p + 2(p - 1) + 1)), \quad (2)$$

где p – порядок фильтра, L – длина обрабатываемого сигнала, l_e – количество отсчетов, на которое продлен сигнал для компенсации переходных процессов, обычно равно 2–3 порядкам фильтра. Однако фильтры, обладающие бесконечной импульсной характеристикой (БИХ фильтры) высоких порядков могут оказаться не устойчивыми, что требует их реализации в виде каскада секций второго порядка, блок-схема которой представлена на Рис. 6.

При этом БИХ фильтр обладает нелинейной фазовой характеристикой, что требует выполнения двунаправленной фильтрации для компенсации возникающих фазовых искажений, о которых шла речь в первой главе настоящей работы. Помимо этого, для компенсации искажений начальных и конечных участков сигнала возникших в результате переходных процессов, производят периодическое продолжение сигнала на количество отсчетов равное не менее чем три порядка фильтра. Произведем оценку вычислительной трудоемкости работы такого фильтра. В качестве меры трудоемкости было использовано значение, равное сумме числа операций умножения, сложения и вычитания, необходимых для обработки сигнала фиксированной длины [16]. Каждая секция цифрового фильтра, представленная на Рис. 6 требует выполнения 4 операций умножений и 4 операций сложения на один отсчет исходного сигнала.

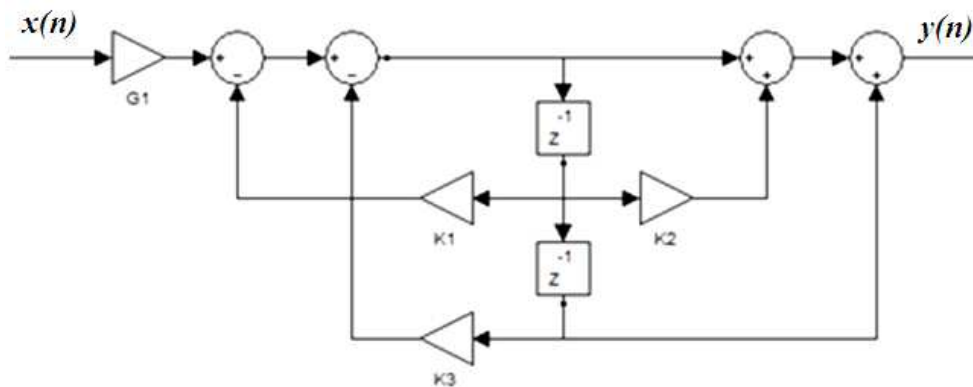


Рис. 6. Блок-схема секции второго порядка. $G1$ – коэффициент передачи секции, $K1$ – $K3$ действительные коэффициенты, Z^{-1} – блок задержки на один такт, $x(n)$ – отсчет сигнала на входе секции, $y(n)$ – отсчет сигнала на выходе секции

При этом трудоемкость с учетом необходимости двунаправленной фильтрации и периодического продолжения сигнала будет равна:

$$I_{IIR} = 2 \cdot (L + l_e) \cdot (8 \cdot N_s), \quad (3)$$

где l_e – количество отсчетов, на которое продлен исходный сигнал для компенсации искажений вызванных переходными процессами, N_s – общее количество секций. Фильтры, обладающие конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтры) обладают линейной фазовой характеристикой и не требуют выполнения двунаправленной фильтрации. КИХ-фильтр может быть реализован при помощи каскада, состоящего из усилителей и блоков задержек, блок-схема такого каскада представлена на Рис. 7.

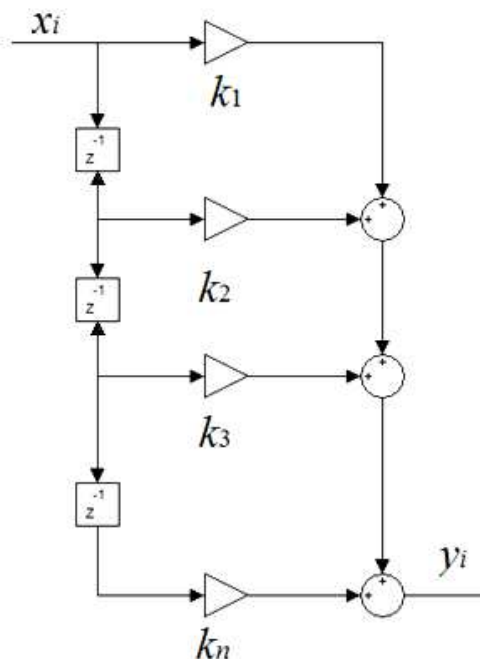


Рис. 7. Блок-схема КИХ-фильтра. k_1 – k_n действительные коэффициенты, Z^{-1} – блок задержки на один такт, x_i – отсчет сигнала на входе секции, y_i – отсчет сигнала на выходе секции

Показанный на Рис. 7 каскад реализуется может в виде разностного уравнения:

$$y(n) = \sum_{k=0}^M b(k)x(n - k), \quad (4)$$

Трудоемкость фильтрации таким способом определяется порядком фильтра и равна:

$$O_{FIR} = 2n(L + l_e), \quad (5)$$

где n – порядок фильтра, L – длина обрабатываемого сигнала, l_e – количество отсчетов, на которое продлен сигнал для компенсации переходных процессов.

Другим способом фильтрации сигнала является способ, основанный на применении многоуровневого дискретного вейвлет преобразования. Многоуровневое дискретное вейвлет преобразование заключается в каскадном соединении полуполосных фильтров декомпозиции, как показано на блок-схеме, представленной на Рис. 8.

Исходный сигнал X_i , подаваемый на вход блока фильтров, обладает частотной полосой $f = 0 \sim f_0$, $f_0 = f_s/2$, где f_s – частота дискретизации сигнала. На каждом уровне разложения формируются коэффициенты аппроксимации (низкочастотная составляющая) и коэффициенты детализации (высокочастотная составляющая), в результате чего на определенном уровне разложения становится возможным локализовать искомые частотные составляющие исходного сигнала. Полученные вейвлет коэффициенты (дискретные сигналы на выходе фильтров декомпозиции) содержащие искомые частоты обнуляются, при помощи пороговых преобразований. После выполнения пороговых преобразований производится восстановления сигнала по вейвлет коэффициентам при помощи фильтров реконструкции, аналогично процессу, показанному на Рис. 8.

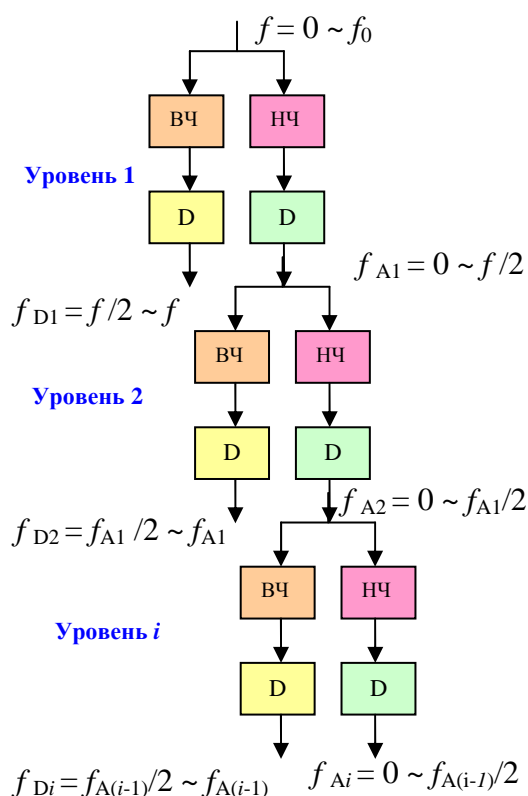


Рис. 8. Блок-схема многоуровневого вейвлет-преобразования. X – исходный сигнал, НЧ – фильтр низких частот, ВЧ – фильтр высоких частот D – блок понижения частоты дискретизации сигнала в два раза, f – полоса исходного сигнала, f_s – частота дискретизации исходного сигнала f_{Ai} – частотная полоса коэффициентов аппроксимации на i -м уровне разложения, f_{Bi} – частотная полоса коэффициентов детализации на i -м уровне разложения

Существует несколько различных способов реализации дискретного вейвлет преобразования – один из них выполнение операции свертки ядра фильтра декомпозиции и обрабатываемого сигнала:

$$A_k = \sum_{m=0}^k x_m \cdot h_{k-m} \quad (6)$$

$$D_k = \sum_{m=0}^k x_m \cdot g_{k-m} \quad (7)$$

$$k = \overline{1, N}$$

где A_k – коэффициенты аппроксимации, D_k – коэффициенты детализации, размерность N которых равна сумме длин исходной последовательности и ядра фильтра минус единица.

Количество вычислительных операций необходимых для выполнения свертки, при помощи которого определим вычислительную сложность выполнения прямого вейвлет преобразования по схеме, приведенной на Рис. 8, зависит от N и равно:

$$O_c = \sum_{i=0}^N 2i + 1 \quad (8)$$

Для удобства вычисления оценку (8) можно представить в виде арифметической прогрессии с шагом $d = 2$, сумма первых n членов которой равна:

$$O_c = \frac{a_1 + a_n}{2} N \quad (9)$$

где $a_1 = 1$, $a_n = 2N + 1$, N – длина результирующей последовательности.

При этом опустим дополнительные вычислительные операции, вызванные необходимостью выполнения прореживания и продолжения исходного сигнала, необходимого для его полного восстановления [10]. Выполнение одного уровня преобразования требует двукратного выполнения операции свертки, и его трудоемкость с учетом (9) будет равна:

$$O_n = 2O_c = 2 \frac{a_1 + a_{Ln}}{2} L_n \quad (10)$$

где O_n – трудоемкость выполнения вейвлет преобразования на уровне n , L_n – длина результата свертки на уровне разложения n .

Тогда с учетом (10) трудоемкость выполнения прямого многоуровневого вейвлет преобразования будет определяться по выражению:

$$O_{DWT} = \sum_{n=1}^{N_L} O_n \quad (11)$$

где N_L – количество уровней разложения, равное 10 для схемы, показанной на Рис. 8.

При этом следует отметить, что частота дискретизации последовательностей, полученных в результате выполнения свертки (6) и (7), снижается в два раза. Как было сказано выше, после получения необходимых коэффициентов вейвлет разложения производится их пороговая обработка с последующим выполнением обратного многоуровневого преобразования для получения сигнала прошедшего фильтрацию, трудоемкость которого определяется аналогично (8-11).

3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОШИБКИ ФИЛЬТРАЦИИ И ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ-ШУМ

Как было показано выше, для обеспечения диагностической пригодности ЭКС, его частотная полоса должна находиться в пределах 0,05–150 Гц, в данную полосу также попадают частоты, наличие которых вызвано наводкой напряжения промышленной частоты. В связи с этим необходимо оценить качество фильтрации частот наводки напряжения промышленной частоты, низкочастотных, высокочастотных компонент.

Для оценки эффективности работы фильтров

используем в качестве меры достигаемое отношение сигнал-шум. При определении отношения сигнал-шум для различных типов фильтров был использован ЭКС, полученный с частотой дискретизации 0,5 кГц, с добавленными аддитивными составляющими частоты 0,01 Гц, 50 Гц, 200 Гц и изменяемой амплитудой в пределах 10–90 % от амплитуды исходного сигнала. После чего полученный сигнал подается на вход системы фильтрации и для полученного на выходе сигнала определяется отношение сигнал-шум:

$$SNR = 20 \lg \left(\frac{A_s}{A_n} \right), \quad (12)$$

где A_s – средняя амплитуда сигнала, прошедшего фильтрацию, A_n – средняя амплитуда шума присутствующего в сигнале после фильтрации. Шумовая компонента сигнала, прошедшего фильтрацию определяется из следующего соотношения:

$$n_i = S c_i - S f_i, \quad i = \overline{0, L}, \quad (13)$$

где n_i – отсчет шумовой компоненты, $S c_i$ – отсчет исходного ЭКС без аддитивной составляющей, $S f_i$ – отсчет сигнала, прошедшего фильтрацию, L – длина сигнала.

Оценка вычислительной трудоемкости алгоритма фильтрации позволяет судить о возможности и целесообразности его реализации при помощи применяемых вычислительных средств, а также косвенно судить о скорости

работы данных алгоритмов. Оценка достигаемого отношения сигнал-шум позволит судить о качестве фильтрации сигнала и уровне остаточного шума. Однако уровень остаточного шума зависит не только от АЧХ алгоритма фильтрации, но и от уровня искажений, вносимых алгоритмом фильтрации в полезный сигнал, для оценки которых будет использована оценка PRD :

$$PRD = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^N (x_i - \bar{x}_i)^2}{\sum_{i=0}^N x_i^2}} \cdot 100 \quad (14)$$

где N – длина сигнала, x_i – отсчет сигнала до обработки, \bar{x}_i – отсчет сигнала после обработки. Данная оценка является мерой близости между реальными данными и данными, полученными при помощи оценок, в работе [11] данная оценка используется в качестве меры уровня искажений при сжатии ЭКС с потерями.

4. ВЕЙВЛЕТ ФИЛЬТРАЦИЯ. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НЕОБХОДИМОЙ ГЛУБИНЫ РАЗЛОЖЕНИЯ

В ГОСТ регулирующем параметры электрокардиографических устройств помимо требований к частотной полосе ЭКС, в ГОСТ приведены ограничения на минимальную частоту дискретизации ЭКС равную не менее 0,5 кГц, исходя из этого, было построено дерево многоуровневого вейвлет преобразования, которое представлено на Рис. 9.

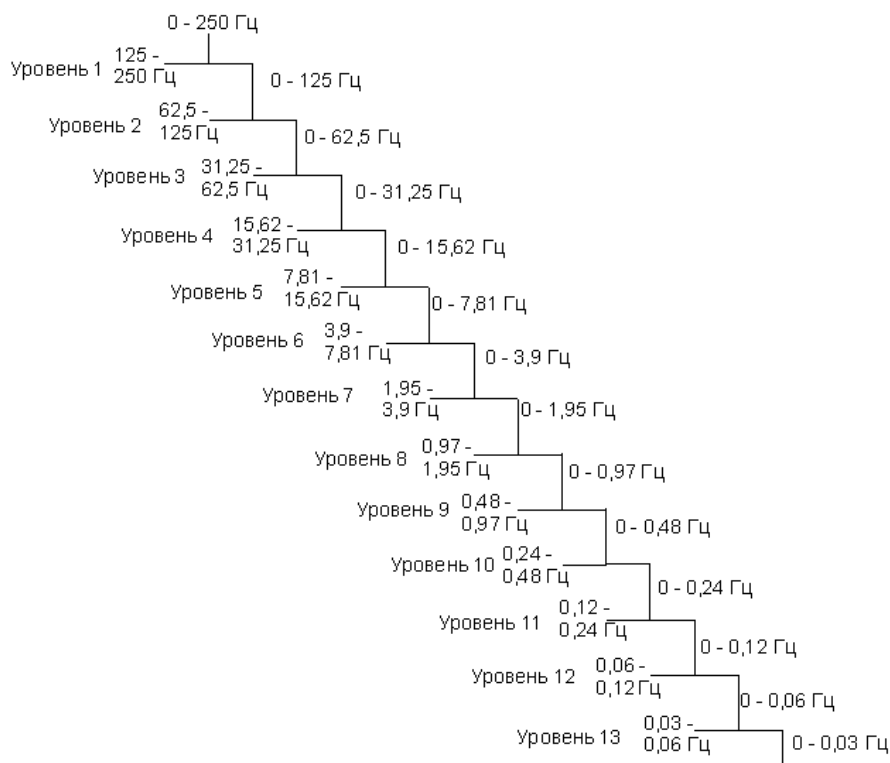


Рис. 1. Дерево многоуровневого прямого вейвлет преобразования

Как видно из Рис. 9, с учетом требуемой частоты дискретизации, для получения вейвлет коэффициентов, несущих информацию о высокочастотных и низкочастотных составляющих необходимо выполнения многоуровневого вейвлет преобразования глубины не менее 13. Уровни вейвлет преобразования 1–3 и уровень 13 далее будем называть интересующими уровнями. Пороговая обработка данных коэффициентов интересующих уровней теоретически позволяет удалить из спектра ЭКС данные частоты, не внося искажений в участки спектра, содержащие частоты *QRST* комплекса [11]. При этом составляющие сигнала, информацию о которых несут интересующие уровни вейвлет разложения, характеризуются нестационарной амплитудой, что приводит к необходимости автоматизированной подстройки порогового значения. От выбора порогового значения существенно зависит качество фильтрации (отношение сигнал-шум) и уровень вносимых в сигнал искажений. В литературе представлено несколько различных методик определения порогового значения, среди которых можно выделить подходы, основанные на статистических характеристиках сигнала, возведении коэффициентов вейвлет разложения, содержащих искомые компоненты в квадрат [11] и другие.

Для определения максимально возможного отношения сигнал-шум и инвариантности к

методике выбора порогового значения было принято решение определить отношение сигнал-шум для всех возможных пороговых значений, принадлежащих интервалу, перекрывающему область значений, интересующих вейвлет коэффициентов

$$[w_{min} - 0.5; w_{max} + 0.5] \quad (15)$$

где w_{min} , w_{max} – минимальное и максимальное значение интересующих вейвлет коэффициентов. При этом пороговые значения из данного интервала были выбраны с шагом равным:

$$|w_{min}|/2 \quad (16)$$

Вариация порогового значения на интервале (14) при шаге (15) позволяет, как оставить вейвлет коэффициенты без изменений, так и полностью их обнулить.

5. СРАВНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ФИЛЬТРОВ ПО КРИТЕРИЮ СИГНАЛ-ШУМ И ОШИБКЕ ФИЛЬТРАЦИИ

При оценке достигаемого отношения сигнал-шум и уровня искажений, вносимых в сигнал в результате фильтрации, были рассмотрены вейвлет функции различных семейств – Добеши, Коифлет, Биортогональные и другие вейвлет функции, однако, наибольшее отношение сигнал шум при наименьшей ошибке *PRD* был получен с использованием вейвлета Добеши 4, результат приведен в Таблице 1.

Таблица 1.

Достижимое отношение сигнал-шум, значение ошибки *PRD*, полученные при использовании вейвлета Добеши 4

Перекрытие, %	Низкие частоты			Высокие частоты			50 Гц		
	<i>PRD</i>	<i>SNR</i>	Порог	<i>PRD</i>	<i>SNR</i>	Порог	<i>PRD</i>	<i>SNR</i>	Порог
10	32	29	-0.12	13	14	0.87	16	15	0.25
50	6.13	24	-0.64	15	16.3	0.4	42	7.9	0.89
90	10.3	19	-1.17	16	16	0.15	72	4.5	1.41

Помимо достигаемого отношения сигнал-шум и ошибки *PRD* в таблице приведено соответствующее пороговое значение. Как видно из Таблицы 1, фильтрация различных составляющих сигнала требует различного порогового значения, которое также зависит от амплитуды аддитивной составляющей, что при работе такой системы фильтрации в реальных условиях потребует процедуры автоматизированной настройки порогового значения или

приведет к существенному снижению качества фильтрации. При этом следует учесть, что в работе [11], где для оценки качества декомпрессии сигнала была использована оценка *PRD*, показано, что значение данной оценки менее 9% соответствует «высокому» качеству восстановления сигнала. Аналогичные исследования были проведены для цифровых БИХ и КИХ фильтров, результат которого приведен в Таблице 2.

Таблица 2.

Достижимое отношение сигнал-шум, значение ошибки *PRD*

Перекрытие, %	Низкочастотные составляющие		Высокочастотные составляющие		50 Гц	
	<i>PRD</i>	<i>SNR</i>	<i>PRD</i>	<i>SNR</i>	<i>PRD</i>	<i>SNR</i>
10	1,85	34	0,3	50	0,4	46
50			0,31		0,5	
90			0,32		0,5	
Тип фильтра	БИХ фильтр, -3 дБ на частоте 0,05 Гц.		БИХ фильтр, -3 дБ на частоте 150 Гц.		Узкополосный БИХ фильтр, с полосой 15 Гц.	

Как видно из сравнения *Таблицы 1* и *Таблицы 2*, системы фильтрации с фиксированной АЧХ в области высоких частот обладают преимуществами перед системами вейвлет-фильтрации, имеющими возможность плавного изменения АЧХ в реальном времени.

При проведении данного исследования были рассмотрены различные типы фильтров, при синтезе которых учитывался порядок, влияющий на вычислительную сложность фильтрации

сигнала, вид переходного процесса, влияющий на искажения, вносимые в сигнал, а также уровень пульсаций АЧХ. В качестве фильтра, предназначенного для ограничения в области низких частот, был использован фильтр Баттерворта второго порядка, обеспечивающий подавление -3 дБ на частоте $0,05 \text{ Гц}$, реализованный в виде разностного уравнения, АЧХ такого фильтра и показана на *Рис. 10*.

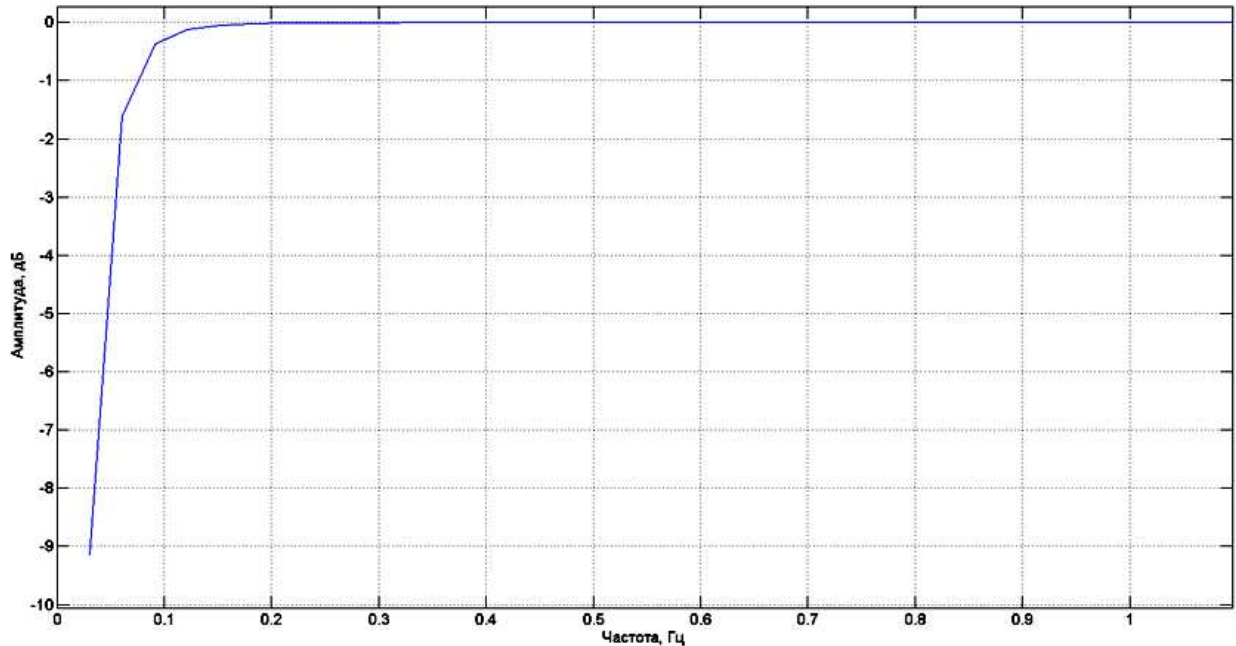


Рис. 10. Амплитудно-частотная характеристика фильтра высоких частот

Фильтр Баттерворта обладает гладкой АЧХ, а также более близкую к линейной, фазовую характеристику в области полосы пропускания по сравнению с другими БИХ фильтрами. КИХ фильтры, обладающие АЧХ приведённой на *Рис. 10* будут обладать более высоким порядком, что приведет к необходимости выполнения

дополнительных вычислительных операций. Для ограничения высоких частот был применен БИХ-фильтр восьмого порядка (относительный порядок равен нулю), реализованный в виде разностного уравнения и имеющий гладкую АЧХ, приведённую на *Рис. 11*.

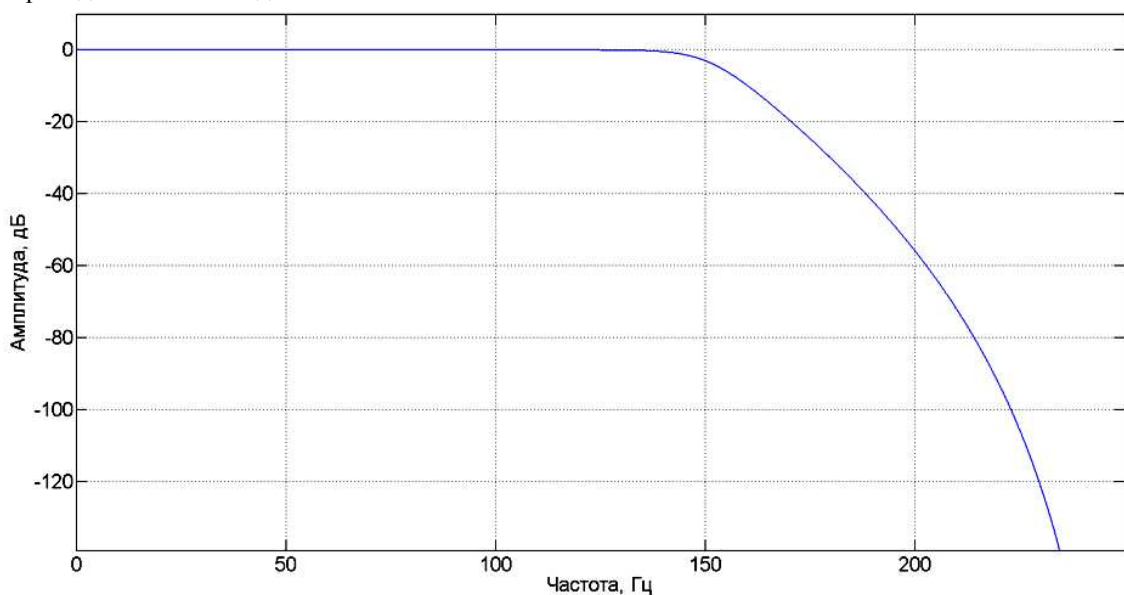


Рис. 11. Амплитудно-частотная характеристика фильтра низких частот

Следует отметить, что во время проведения данного эксперимента был исследован случай действия одной определенной аддитивной составляющей, что на практике встречается редко и далее рассмотрено поведение блока фильтров в условиях действия всех трех аддитивных составляющих. Помимо ошибки фильтрации и достигаемого отношения сигнал-шум определим вычислительную трудоемкость блока цифровых фильтров при помощи выражения (2) и системы вейвлет фильтрации в соответствии с выражением (10) для 13 уровней разложения, в соответствии со схемой показанной на Рис. 9. Полученные значения оцениваемых параметров для различных типов фильтров приведены в Таблице 3.

Таблица 3.

Значения отношения сигнал-шум, ошибка PRD и вычислительная трудоемкость для различных типов фильтров. ДВП – фильтрация с использованием дискретного вейвлет преобразования, ЦФ – фильтрация блоком цифровых фильтров: O_f - вычислительная сложность

	PRD	SNR	O_f
ДВП	25	20	$6,75 \cdot 10^7$
ЦФ	3	30	$1,17 \cdot 10^5$

В результате эксперимента, результаты

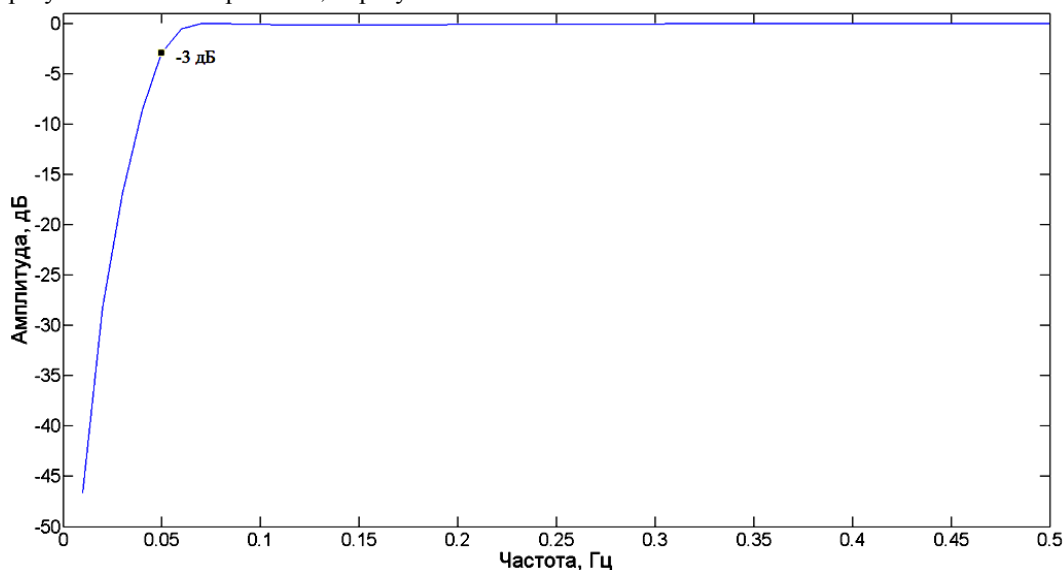


Рис. 13. Амплитудно-частотная характеристика фильтра, основанного на шунт-компенсаторе

В результате совместного применения шунт компенсатора, узкополосного фильтра и фильтра низких частот было получено отношение сигнал-шум в пределах 28–30 и значение ошибки PRD в пределах 2–5, в зависимости от амплитуды аддитивных составляющих.

6. ОЦЕНКА КАСКАДА ФИЛЬТРОВ ПРИ ПОМОЩИ МЕТОДИКИ, ПРИВЕДЕННОЙ В ГОСТ

В ГОСТ для оценки пригодности получа-

емого сигнала предложена методика оценки динамических характеристик измерительного тракта электрокардиографа, позволяющая оценить допустимость амплитудно-частотной характеристики измерительного тракта, адекватность воспроизведения элементов QRST комплексов. Следует отметить, что данные испытания предусмотрены для всего измерительного тракта электрокардиографа, следовательно, алгоритмы цифровой обработки данных должны удовлетворять приведенным требова-

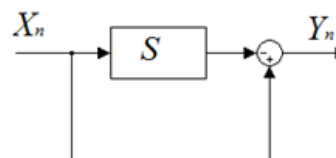


Рис. 12. Блок-схема шунт компенсации. X_n – входной сигнал, Y_n – сигнал на выходе, S – шунт

Подход, основанный на шунт компенсации, заключается в получении низкочастотной части сигнала при помощи НЧ фильтра S вычитаемой из исходного сигнала. Примененный фильтр S по сравнению с ВЧ фильтром обладает меньшим временем переходного процесса и меньшим перерегулированием. При этом АЧХ данного фильтра, показанная на Рис. 13, имеет подавление -3 дБ на частоте 0,05 Гц, что удовлетворяет требованиям ГОСТ.

ниям. Такая методика заключается в оценке амплитуд синусоидальных сигналов на входе измерительного канала и его выходе. Методика испытаний с помощью синусоидальных сигналов позволяет оценить адекватность воспроизведения в заданной полосе пропускания, высокочастотных составляющих ЭКС. Для оценки адекватного воспроизведения потенциально низкоамплитудного зубца *R* и *ST* сегмента данная методика предусматривает испытания с использованием треугольных и прямоугольных импульсов. Испытание при помощи синусои-

дальных сигналов состоит из следующих этапов:

1. Оценка при помощи синусоидальных сигналов амплитуды 1 мВ и частотой варьируемой в пределах $0,67\text{--}40\text{ Гц}$, позволяющая оценить адекватность воспроизведения основных частот *QRS* комплексов [8]. При этом отклонение амплитуды сигнала на выходе блока фильтров должно находиться в пределах $\pm 10\%$ относительно амплитуды сигнала частоты 10 Гц . На *Рис. 14* представлена АЧХ блока фильтров в пределах данной полосы.

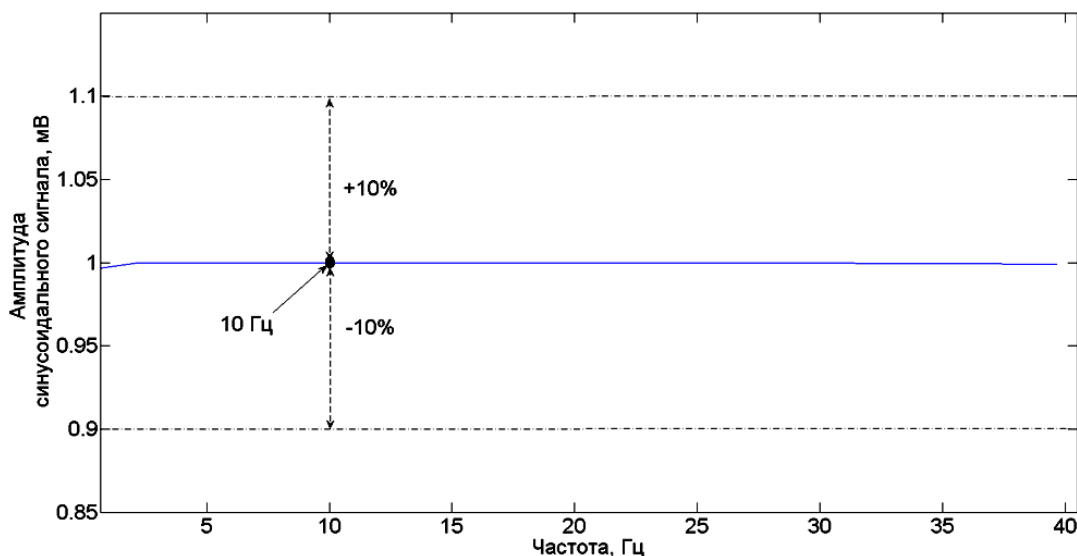


Рис. 14. Амплитудно-частотная характеристика блока фильтров в пределах $0,67\text{--}40\text{ Гц}$; пунктирной линией показана область $\pm 10\%$ допустимого отклонения амплитуды сигнала на выходе блока фильтров

Как видно из *Рис. 14*

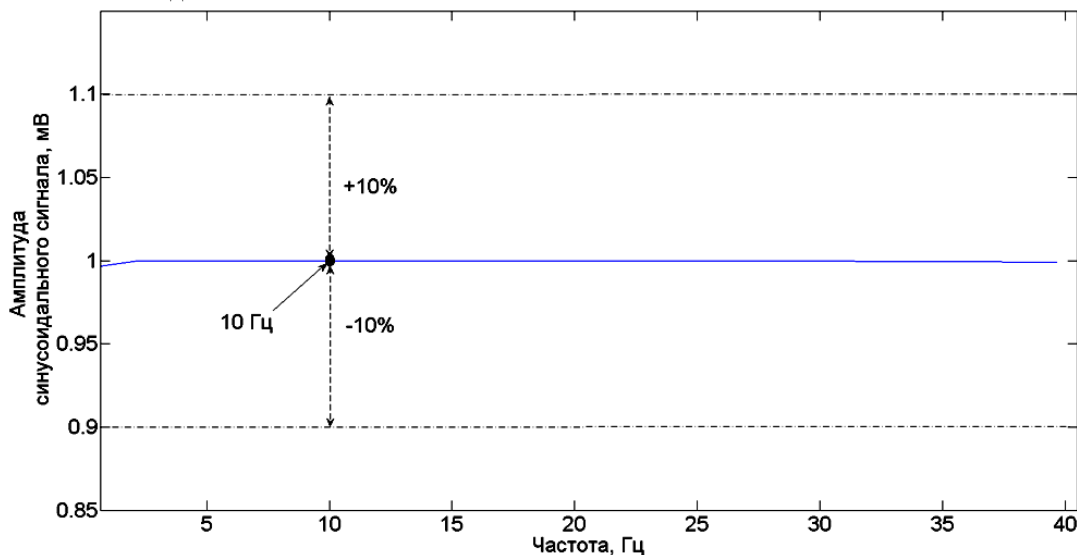


Рис. 14, амплитудно-частотная характеристика блока фильтров в полосе $0,67\text{--}40\text{ Гц}$ находится в области $\pm 10\%$ допуска на всем протяжении данной частотной полосы.

2. Оценка при помощи синусоидальных сигналов амплитуды 1 мВ и частотой, варьируемой в пределах $40\text{--}100\text{ Гц}$, позволяющая оценить адекватность воспроизведения высокочастотных составляющих сигнала. В данном

случае допускается отклонение амплитуды в пределах $+10\%$ / -30% относительно амплитуды сигнала частоты 10 Гц . Результат данной оценки приведен на *Рис. 15* в виде АЧХ в заданной полосе частот.

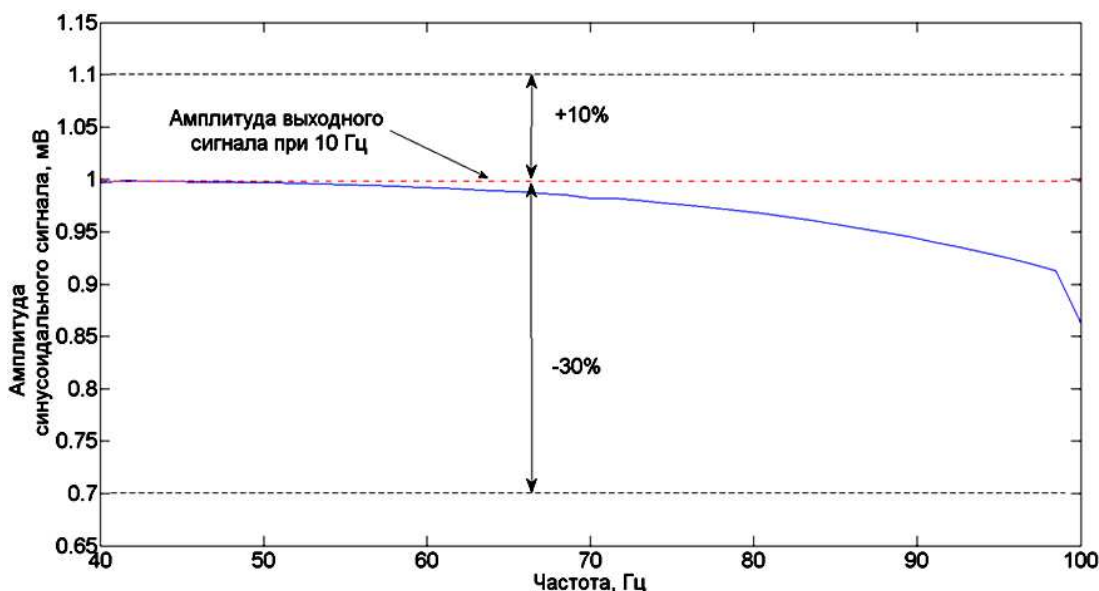


Рис. 15. Амплитудно-частотная характеристика блока фильтров в пределах 40–100 Гц, пунктирными линиями показана область допустимого отклонения амплитуды сигнала на выходе блока фильтров

Как видно из Рис. 15, амплитудно-частотная характеристика блока фильтров в полосе частот 40–100 Гц находится в пределах допуска, в области высоких частот наблюдается снижение амплитуды выходного сигнала за счет работы фильтра, ограничивающего высокие частоты сигнала.

3. Оценка при помощи синусоидальных сигналов амплитуды 0,25 мВ и частотой,

варьируемой в пределах 100–150 Гц, позволяющая оценить адекватность воспроизведения высокочастотных составляющих сигнала. При этом допускается отклонение амплитуды выходного сигнала в пределах +10% / -50% от амплитуды синусоидального сигнала частотой 10 Гц. В результате такого эксперимента была получена АЧХ приведенная на Рис. 16.

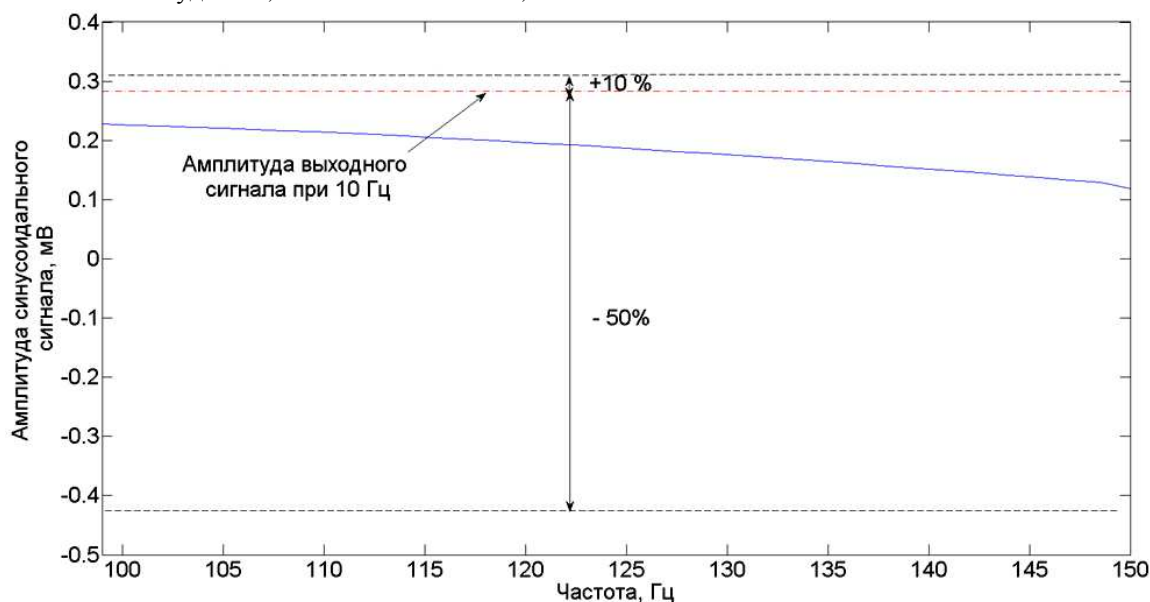


Рис. 16. Амплитудно-частотная характеристика блока фильтров в пределах 100–150 Гц. Пунктирными линиями показана область допустимого отклонения амплитуды сигнала на выходе блока фильтров

После оценки адекватности воспроизведения низкочастотных и высокочастотных при помощи синусоидальных сигналов различной частоты и амплитуды, произведем оценку адекватности воспроизведения QRS комплексов и точность воспроизведения ST сегмента. Адекватность воспроизведения QRS комплексов производится при помощи двух сигналов треугольной формы –

с шириной основания 20 мс и 200 мс, амплитудой 1,5 мВ и частотой менее 1 Гц. При этом допускается 12% снижение максимальной амплитуды выходного сигнала (измеряемого амплитуды выходного сигнала), полученного при входном сигнале с шириной основания 20 мс, относительно сигнала (опорного сигнала), полученного при выходном треугольном сигнале с шириной основания

200 мс, моделирующих наиболее неблагоприятный зубец R, вид таких сигналов показан на Рис. 17. Результат эксперимента, в основе которого лежит применение треугольных

импульсов, моделирующих QRS комплексы, показано на Рис. 18.

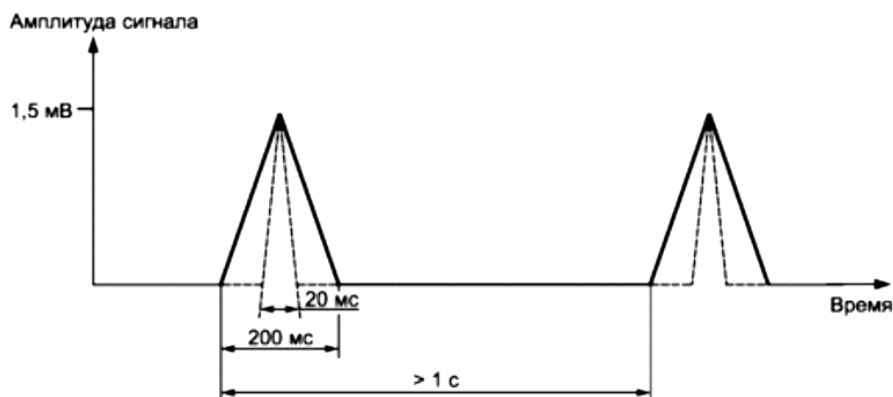


Рис. 17. Треугольные импульсы для оценки адекватности воспроизведения R зубца

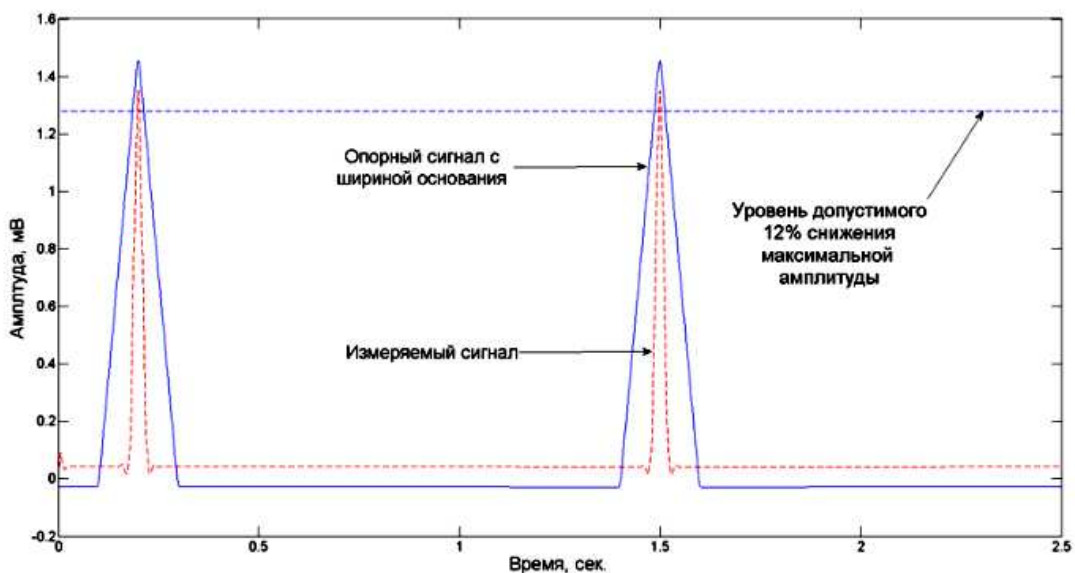


Рис. 18. Результат испытания при помощи сигналов треугольной формы. Сплошной линией показан сигнал с основанием 200 мс, пунктирной с основанием 20 мс, а штрихпунктирной линией показан уровень допустимого снижения максимальной амплитуды выходного сигнала

При этом следует отметить, что в соответствии с ГОСТ, испытания при помощи синусоидальных сигналов проводились без использования узкополосного фильтра сетевой частоты, а испытание, результат которого приведен на Рис. 18 проводилось с использованием такого фильтра с целью оценки вносимых данным фильтром искажений в полезный сигнал. Как видно из Рис. 13, сигнал треугольной формы, полученный на выходе каскада фильтров обладает приемлемой амплитудой с точки зрения испытаний, предложенных в ГОСТ. После оценки адекватности воспроизведения определенных частот и

оценки снижения амплитуды треугольного сигнала, произведем оценку искажений, вносимых в ST сегмент кардиоцикла. Как показано в ГОСТ, испытания с использованием прямоугольных сигналов. Прямоугольный импульс с амплитудой 3 мВ и длительностью 100 мс, не должен создавать смещение ЭКС от изоэлектрической линии более чем на 100 мкВ и наклон более 250 мкВ/с в области 200 мс после импульса и наклон 100 мкВ/с в остальной области вне импульса. Вид смоделированного испытательного прямоугольного сигнала и вид сигнала на выходе блока фильтров приведен на Рис. 19.

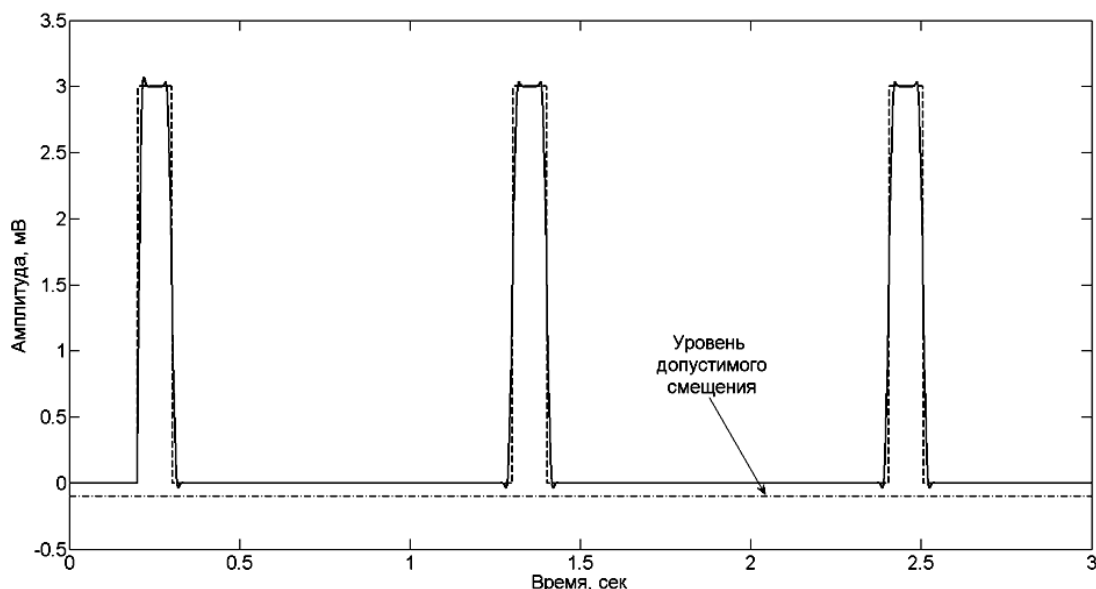


Рис. 19. Результат испытания при помощи прямоугольного импульсного сигнала. Пунктирная линия – испытательный сигнал, пунктирная – отклик блока фильтров, штрихпунктирная – уровень допустимого смещения сигнала.

Как видно из Рис. 19, использованный блок фильтров вносит допустимое смещение в испытательный сигнал. В результате экспериментов с использованием испытательных сигналов предложенных в ГОСТ было установлено, что использованный блок фильтров обладает подходящими характеристиками, и он не будет вносить недопустимых искажений в полезный сигнал. Кроме того, в результате экспериментов было установлено, что использованный блок фильтров с фиксированной АЧХ, обеспечивает более высокое значение отношения сигнал-шум по сравнению с системой фильтрации основанной на вейвлет-преобразовании и обеспечивающей динамическую подстройку АЧХ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено исследование эффективности алгоритмов фильтрации ЭКС, выполняемой для подавления наводки напряжения промышленной частоты, а также для формирования полосы сигнала удовлетворяющей требованиям ГОСТ Р МЭК 60601-2-51-2008, необходимой для частичной компенсации дрейфа изолинии и подавления высокочастотных компонент, наличие которых вызвано мышечным напряжением. На основе экспериментальных данных полученных при помощи емкостных сенсоров, показано, что при использовании каскада цифровых фильтров (ЦФ) достигается отношение сигнал-шум равное 30, а в случае использования аппарата дискретного вейвлет преобразования (ДВП) равное 20, при этом обработка участка ЭКС при помощи каскада ЦФ потребует на два порядка меньше вычислительных операций по сравнению с ДВП. Показано, что примененный блок цифровых фильтров удовлетворяет требованиям, приведённым в ГОСТ Р МЭК 60601-2-51-2008.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Fishman G. I. et al. Sudden cardiac death prediction and prevention report from a National Heart, Lung, and Blood Institute and Heart Rhythm Society workshop. *Circulation*. – 2010. – Т. 122. – №. 22. – С. 2335-2348.
- [2] А. Струтынский. Электrokардиограмма: анализ и интерпретация, Москва: ООО "МЕДпресс". 1999.
- [3] Г. Алдонин. Автономный мониторинг комплекса параметров сердечно-сосудистой системы. *Медицинская техника*. 2012. № 6, с. 14-17.
- [4] E. Jovanov, A. O'Donnell Lords, D. Raskovic, P.G. Cox, R. Adhami, F. Andrasik. Stress monitoring using a distributed wireless intelligent sensor system. *Engineering in Medicine and Biology Magazine, IEEE*. V. 22, № 3, 2003.
- [5] R. Fensli, E. Gunnarson, T. Gundersen. A wearable ECG-recording system for continuous arrhythmia monitoring in a wireless tele-home-care situation. *18 th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems*. 2005.
- [6] К.В. Зайченко. Съём и обработка биоэлектрических сигналов. Санкт-Петербург: РИО ГУАП, 2001.
- [7] Р. Блейхут. Теория и практика кодов, исправляющих ошибки. М.: Мир. 1982.
- [8] В. И.Воробьев, В. Г.Грибуни. Теория и практика вейвлет-преобразования. 1999: вуС. С-Пб.
- [9] Y.Zigel, A.Cohen, A. Katz. The weighted diagnostic distortion (WDD) measure for ECG signal compression. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on* ., V 47, № 11, pp. 1422-1430, 2000.
- [10] P. M.Agante, J. P. M. De Sá. ECG noise filtering using wavelets with soft-thresholding methods. *Computers in Cardiology*, pp. 535-538., 1999 .
- [11] В. М.Beckmann, A. Pfeufer, S. Kääb. Inherited cardiac arrhythmias: diagnosis, treatment, and prevention. *Deutsches Ärzteblatt International*, V. 108, № 37, p. 623, 2011.

System of Mobile Cardiac of Human Activity Monitoring: the Applicability of Different Filtering Methods for Electrocardiosignal

D.N. KATASONOV

Abstract: The paper considers individually compact mobile cardiac monitoring system of human activity, which has the ability to automate the analysis of the data. The paper proposes a comparative analysis of approaches to filtering electrocardiosignal on the criterion of achievable signal-to-noise ratio, error filtering and computational complexity.

Key words: mobile monitoring electrocardiosignal, wavelet filtering, compensation network crosstalk, signal to noise ratio, limiting range of EX.

REFERENCES

- [1] Fishman G. I. et al. Sudden cardiac death prediction and prevention report from a National Heart, Lung, and Blood Institute and Heart Rhythm Society workshop. *Circulation*. – 2010. – Т. 122. – №. 22. – S. 2335-2348.
- [2] A. Strutynskij. *Jelektrokardiogramma: analiz i interpretacija*, Moskva: ООО "MEDpress". 1999.
- [3] G. Aldonin. *Avtonomnyj monitorang kompleksa parametrov serdechno-sosudistoj sisemy. Medicinskaja tehnika*. 2012. № 6, s. 14-17.
- [4] E. Jovanov, A. O'Donnell Lords, D. Raskovic, P.G. Cox, R. Adhami, F. Andrasik. Stress monitoring using a distributed wireless intelligent sensor system. *Engineering in Medicine and Biology Magazine*,

- IEEE. V. 22, № 3, 2003.
- [5] R. Fensli, E. Gunnarson, T. Gundersen. A wearable ECG-recording system for continuous arrhythmia monitoring in a wireless tele-home-care situation. 18th IEEE Symposium on Computer-Based Medical Systems. 2005.
- [6] K.V. Zajchenko. *S#em i obrabotka bioelektricheskih signalov*. Sankt-Piterburg: RIO GUAP, 2001.
- [7] R. Blejhut. *Teorija i praktika kodov, ispravljajushih oshibki*. M.: Mir. 1982.
- [8] V. I.Vorob'ev, V. G.Gribunin. *Teorija i praktika vejevlet-preobrazovanija*. 1999: vuS. S-Pb.
- [9] Y.Zigel, A.Cohen, A. Katz. The weighted diagnostic distortion (WDD) measure for ECG signal compression. *Biomedical Engineering, IEEE Transactions on* , V 47, № 11, pp. 1422-1430, 2000.
- [10] P. M.Agante, J. P. M. De Sá. ECG noise filtering using wavelets with soft-thresholding methods. *Computers in Cardiology*, pp. 535-538., 1999.
- [11] B. M.Beckmann, A. Pfeufer, S. Kääb. Inherited cardiac arrhythmias: diagnosis, treatment, and prevention. *Deutsches Ärzteblatt International*, V. 108, № 37, p. 623, 2011.



Денис Николаевич Катасонов - инженер-программист Института Автоматики и электрометрии СО РАН, аспирант Новосибирского государственного технического университета, Новосибирск, Россия.

Область научных Интересов: цифровая обработка данных, теория кодирования, автоматическое управление.

E-mail: katsonovdenis@ya.ru

Выбор наилучшей двухпараметрической пороговой функции в алгоритмах вейвлет-фильтрации

Ю.Е.Воскобойников^{1,2}, Д.А. Крысов¹

¹ ФГБОУ ВПО НГТУ, ² ФГБОУ ВПО НГАСУ (Сибстрин) Новосибирск, Россия

Аннотация: Большинство используемых алгоритмов вейвлет-фильтрации носят пороговый характер: коэффициент разложения меньше по абсолютной величине некоторой пороговой величины зануляется, в противном случае коэффициент подвергается некоторому (чаще всего нелинейному) преобразованию, которое задается используемой пороговой функцией. В настоящее время используются двухпараметрические пороговые функции, которые в определенной степени лишены недостатков, присущих традиционным однопараметрическим пороговым функциям. В литературе предложено несколько таких функций, однако отсутствуют комплексные исследования влияния вида пороговой функции на ошибку вейвлет-фильтрации, что затрудняет обоснованное применение таких пороговых функций на практике. В работе выполнены оригинальные исследования влияния четырех видов функций на ошибку фильтрации как одномерных сигналов, так и изображений при различных уровнях шума измерений. Вводится коэффициент оптимальности, позволяющий объективно сравнивать разные пороговые функции. На основе анализа этого коэффициента даются практические рекомендации по применению наилучших (оптимальных) пороговых функций.

Ключевые слова: вейвлет-представление сигналов, пороговые алгоритмы вейвлет-фильтрации, пороговые функции, однопараметрические пороговые функции, коэффициент оптимальности пороговых функций, наилучшая пороговая функция

ВВЕДЕНИЕ

Фильтрация в базисе вейвлет-функций (так же, как и Фурье-фильтрация) включает три этапа:

- вычисление прямого дискретного вейвлет-преобразования (нахождение коэффи-

циентов разложения по зашумленным значениям дискретного сигнала);

- обработка «зашумленных» коэффициентов разложения;
- вычисление обратного дискретного вейвлет-преобразования (нахождение «сглаженных» значений дискретной функции).

Совокупность этих трех этапов принято называть *вейвлет-фильтрацией*. Очевидно, что качество фильтрации зашумленного сигнала определяется алгоритмами обработки, используемыми на втором этапе. Большинство применяемых на практике 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, имеющие известные и весьма существенные недостатки. Поэтому в последнее время используются двухпараметрические пороговые функции, в определенной степени свободные от этих недостатков и зависящие уже от двух параметров. При этом вид функции оказывает влияние на величину ошибки фильтрации. Однако в соответствующих научных публикациях отсутствуют комплексные исследования влияния вида используемых на практике пороговых функций на ошибку вейвлет-фильтрации, что затрудняет обоснованное применение двухпараметрических пороговых функций на практике. Заметим, что в работе [1] были выполнены подобные исследования только для двух функций, и они не включали в себя исследования влияния вида функции при фильтрации изображений.

Поэтому данная работа посвящена комплексным исследованиям влияния четырех видов пороговых функций на ошибку фильтрации, как одномерных сигналов, так и изображений при различных уровнях шума измерений. Вводится коэффициент опти-

мальности, позволяющий объективно сравнивать разные пороговые функции. На основе анализа этого коэффициента выбирается наилучшая (оптимальная) двухпараметрическая пороговая функций с наименьшей среднеквадратической ошибкой фильтрации.

1. ДВУХПАРАМЕТРИЧЕСКИЕ ПОРОГОВЫЕ ФУНКЦИИ АЛГОРИТМОВ ВЕЙВЛЕТ – ФИЛЬТРАЦИИ

Кратко приведем основные понятия и определения, необходимые для изложения результатов работы (подробнее см. [2-4]). Многомасштабное (multiresolution) представление функции $f(t)$ в базисе вейвлет-функции имеет вид [5,6]:

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

которое можно интерпретировать как восстановление функции $f(t)$ по ее коэффициентам разложения на J -м уровне (j_0 -начальный уровень разложения). 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:

$$a_{j,k} = \int_R f(t) \varphi_{j,k}(t) dt, \quad d_{j,k} = \int_R f(t) \psi_{j,k}(t) dt, \quad (2)$$

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. Системы функций $\{\varphi_{j,k}(t)\}$, $\{\psi_{j,k}(t)\}$ составляют ортогональный базис пространств вейвлет – функций (подробнее см. [2,3,7]). Заметим, что 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.

Теоретической основой пороговых алгоритмов вейвлет-фильтрации является следующая предпосылка: уровень коэффициентов разложения случайных ошибок исходных сравнительно мал по сравнению с коэффициентами разложения точного сигнала, что позволяет распознать две ситуации: «шумовой» коэффициент (в основном обусловлен шумом измерения) и «информативный» коэффициент (в основном определяется значениями точного сигнала). Таким образом, для успешной фильтрации необходимо обратить в ноль шумовые коэффициенты, сохранив при этом информативные коэффициенты разложения. Эта идея реализуется пороговыми алгоритмами обработки «зашумленных» коэффициентов разложения.

Хронологически первыми в алгоритмах вейвлет-фильтрации использовались однопара-

метрические пороговые функции:

- «жесткая» пороговая функция вида:

$$T_H(\tilde{d}, \lambda) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{d}| \leq \lambda; \\ \tilde{d}, & \text{если } |\tilde{d}| > \lambda \end{cases} \quad (3)$$

- «мягкая» пороговая функция вида:

$$T_S(\tilde{d}, \lambda) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{d}| \leq \lambda, \\ \text{sign}(\tilde{d}) \cdot [|\tilde{d}| - \lambda], & \text{если } |\tilde{d}| > \lambda; \end{cases} \quad (4)$$

где λ – величина порога, \tilde{d} – обрабатываемый коэффициент разложения (как правило – это детализирующие коэффициенты, относительная погрешность которых на порядок и более выше, чем у аппроксимирующих коэффициентов (см. [7], стр. 58-60). Графики функций (3), (4) приведены на Рис. 1 для $\lambda = 1$ (1 – график функции (3), 2 – функция (4)).

Отметим характерные особенности этих функций:

- из-за уменьшения амплитуды коэффициента разложения на величину λ в функции $T_S(\tilde{d}, \lambda)$ возможно сглаживание (размытие) контрастных элементов обрабатываемого сигнала, особенно при больших значениях λ ;
- наличие в функции $T_H(\tilde{d}, \lambda)$ разрыва в окрестности λ может вызвать появление осцилляций (эффект Гиббса) в «особых» точках обрабатываемого сигнала.

Для преодоления этих недостатков в литературе были предложены *двухпараметрические функции*, которые сейчас будут рассмотрены.

$$T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{d}| \leq \lambda_1; \\ \text{sign}(\tilde{d}) \frac{\lambda_2 (|\tilde{d}| - \lambda_1)}{\lambda_2 - \lambda_1}, & \text{если } \lambda_1 < |\tilde{d}| \leq \lambda_2, \\ \tilde{d}, & \text{если } |\tilde{d}| > \lambda_2, \end{cases} \quad (5)$$

которая включает уже две пороговые величины λ_1, λ_2 . График этой функции (при $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 2$) приведен на *Рис. 1* (кривая 3). В работе [8] были исследованы статистические характеристики ошибок фильтрации для трех пороговых функций (3), (4), (5). Было показано (аналитически и в вычислительном

$$T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{d}| \leq \lambda_1; \\ \frac{\tilde{d}}{e-1} \cdot \left(e^{\frac{|\tilde{d}| - \lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1}} - 1 \right), & \text{если } \lambda_1 < |\tilde{d}| \leq \lambda_2, \\ \tilde{d}, & \text{если } |\tilde{d}| > \lambda_2, \end{cases} \quad (6)$$

На *Рис. 2* представлены графики функции (6) (кривая 1) и функции (5) (кривая 2), построенные при $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 2$. Видно, что на интервале $[\lambda_1, \lambda_2]$ функция (6) отличается от

$$T_{COM}(\tilde{d}, \lambda, \alpha) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{d}| \leq \lambda; \\ (1 - \mu)T_H(\tilde{d}, \lambda) + \mu T_S(\tilde{d}, \lambda), & \text{если } |\tilde{d}| > \lambda, \end{cases} \quad (7)$$

где $\mu = \alpha \frac{(|\tilde{d}| - \lambda)^2}{\lambda^2}$. Эта пороговая функция есть линейная комбинация «жесткой» и «мягкой» пороговых функций и она также включает два параметра λ, α , при этом $0 \leq \alpha \leq 1$.

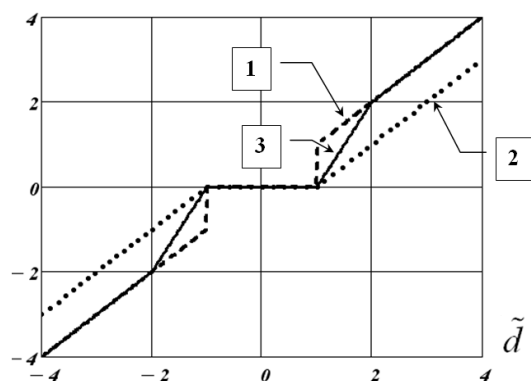


Рис. 1. Графики пороговых функций (3), (4), (5)

1. Пороговая функция $T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$ [8] (обозначаемая в зарубежной литературе как *semisoft* или *firm*) вида:

эксперименте), что функция (3) имеет наименьшее смещение, функция (4) – наименьшую дисперсию, функция (5) – наименьшую СКО фильтрации.

2. Пороговая функция $T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$ [9], определяемая выражением:

прямой (которая присутствует в функции (5)).

3. Комбинированная пороговая функция $T_{COM}(\tilde{d}, \lambda, \alpha)$ [10], определяемая выражением:

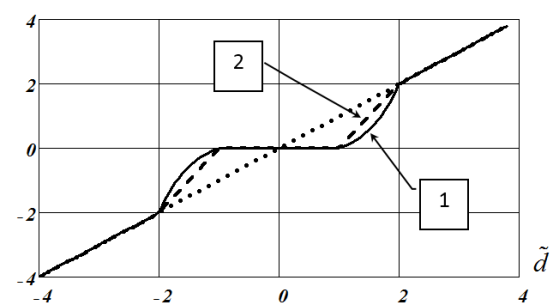


Рис. 2. Графики пороговых функций (5), (6)

Очевидно, что при $\alpha = 0$ значение $\mu = 0$ и $T_{COM}(\tilde{d}, \lambda, 0) = T_H(\tilde{d}, \lambda)$. Если $\alpha = 1$, то $\mu = 1$ и $T_{COM}(\tilde{d}, \lambda, 1) = T_S(\tilde{d}, \lambda)$.

На *Рис. 3* приведены графики функции $T_{COM}(\tilde{d}, 3, \alpha)$ при различных значениях параметра α : кривая 1 – $\alpha = 0.001$; кривая 2 –

$\alpha=0.5$; кривая 3 - $\alpha=0.99$. Эти кривые хорошо иллюстрируют изменение пороговой функции при вариации параметра α .

$$T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C) = \begin{cases} 0, & \text{если } |\tilde{d}| \leq \lambda; \\ \tilde{d} - \lambda + \lambda \cdot th\left(\frac{C}{1-C} \cdot \frac{\tilde{d} - \lambda}{\lambda}\right), & \text{если } \tilde{d} > \lambda; \\ \tilde{d} + \lambda + \lambda \cdot th\left(\frac{C}{1-C} \cdot \frac{\tilde{d} + \lambda}{\lambda}\right), & \text{если } \tilde{d} < -\lambda, \end{cases} \quad (8)$$

где $th(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ - гиперболический тангенс, а параметр C удовлетворяет условию $0 \leq C \leq 1$. Можно показать, что при $C=0$ функция $T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C)$ превращается в $T_H(\tilde{d}, \lambda)$; при $C=1$ - в функцию $T_S(\tilde{d}, \lambda)$.

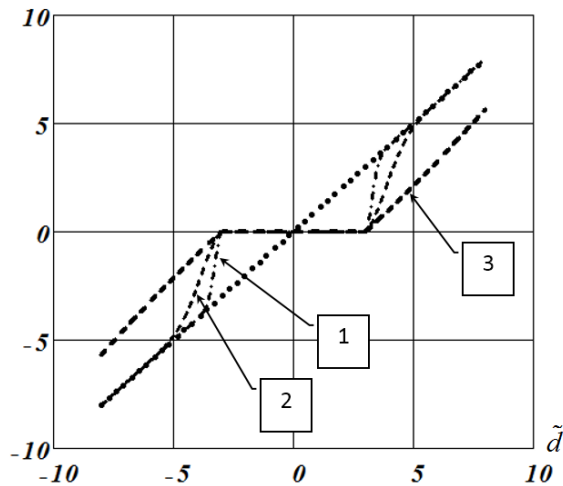


Рис. 3. Графики пороговой функции (7) при разных значениях параметра α

На Рис. 4 показаны значения пороговой функции $T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C)$ при разных значениях C : кривая 1 - значение $C=0.1$; кривая 2 - значение $C=0.4$; кривая 3 - значение $C=0.8$; кривая 4 образует угол с осью абсцисс 45 градусов.

Очевидно, что различное поведение этих функций обуславливает разную ошибку алгоритмов вейвлет-фильтрации, использующих двухпараметрические пороговые функции. Возникает нетривиальный вопрос: **какая из приведенных выше пороговых функций имеет меньшую ошибку фильтрации?** Ответ на этот вопрос позволил бы рекомендовать эту оптимальную функцию для использования на практике.

4. Пороговая функция $T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C)$ [9], определяемая выражением:

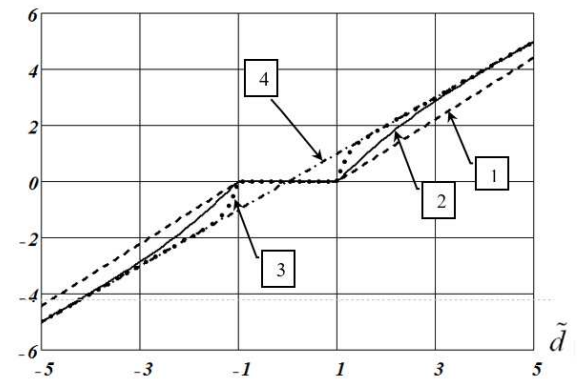


Рис. 4. Графики пороговой функции (8) при разных значениях параметра C

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

К сожалению, пороговый характер обработки коэффициентов вейвлет-разложения зашумленного сигнала обуславливает нелинейность порогового алгоритма вейвлет-фильтрации. Это делает затруднительным дать ответ на предыдущий вопрос исходя из аналитических исследований среднеквадратической ошибки фильтрации с использованием разных пороговых функций.

Поэтому для ответа на вопрос о наилучшей пороговой функции был проведен обширный вычислительный эксперимент по фильтрации одномерных сигналов *Doppler* и *Rectangular* (Рис. 5) и изображений *LENA* и *TARGET* (Рис. 6). Заметим, что *LENA* является стандартным изображением при тестировании алгоритмов фильтрации двумерных сигналов (например, [11]). Характерной чертой этих сигналов является их разные частотные характеристики: *Doppler* и *LENA* представляют собой «гладкие» сигналы, *Rectangular* и *TARGET* - «контрастные» сигналы с резким изменением амплитуд. Спектр последних сигналов является широкополосным, что существенно усложняет их фильтрации из-за совпадений высокочастотных составляющих сигнала и шума измерения.

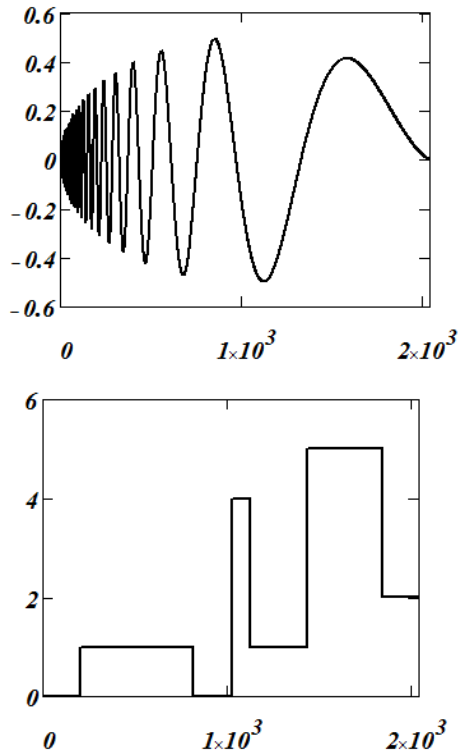


Рис. 5. Одномерные сигналы Doppler и Rectangular



Рис. 6. Изображения LENA и TARGET

Точные значения сигналов и изображений искажались нормально распределенными шумами измерений с нулевым средним и дисперсией, определяемой по задаваемому

относительному уровню шума $\delta_\eta = 0.015, 0.05, 0.15$, который определялся

выражением $\delta_\eta = \frac{\|\tilde{f} - f\|}{\|f\|}$, где $\|\cdot\|$ - евклидова

норма вектора или матрицы.

Для общности записи параметров пороговой функции введем обобщенные параметры θ_1, θ_2 , которые для каждой пороговой функции принимают конкретное содержание. Так, для функции $T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$ положим $\theta_1 = \lambda_1; \theta_2 = \lambda_2$, для функции $T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C)$ имеем $\theta_1 = \lambda; \theta_2 = C$.

Обозначим через \hat{f}_Z результат вейвлет-фильтрации с пороговой функцией Z и определим минимальную относительную ошибку как

$$\delta_Z = \min \left\{ \frac{\|\hat{f}_Z - f\|}{\|f\|} \right\},$$

где f, \hat{f}_Z - не зашумленный (точный) и отфильтрованный сигналы, а минимум определяется по параметрам θ_1, θ_2 , от значения которых зависит ошибка фильтрации. Нахождение минимума является возможным, так как точные значения сигнала в вычислительном эксперименте (в отличие от практики) известны. Заметим, что в работе [12] предложен алгоритм, позволяющий при фильтрации реальных данных достаточно точно оценить оптимальные значения $\theta_{1opt}, \theta_{2opt}$, доставляющие минимум СКО фильтрации.

В качестве меры точности фильтрации при использовании различных пороговых функций принята средняя минимальная относительная ошибка фильтрации $\bar{\delta}_Z$, вычисляемая по объему выборки 30, т.е.

$$\bar{\delta}_Z = \frac{1}{30} \sum_{m=1}^{30} \delta_Z^{(m)},$$

где $\delta_Z^{(m)}$ - минимальная относительная ошибка фильтрации m -ой реализации зашумленного сигнала.

Введем в рассмотрение коэффициент оптимальности пороговой функции Z , определяемый выражением:

$$k_Z = \frac{\min\{\bar{\delta}\}}{\bar{\delta}_Z}.$$

Очевидно, что пороговая функция, имеющая $k_Z = 1$ является наилучшей для вейвлет-фильтрации данного зашумленного сигнала. Значения k_Z для различных пороговых функций и уровней шума представлены в Таблице 1 (одномерные сигналы) и Таблице 2

(изображения). Ячейки, в которых $k_z = 1$ (максимальное значение), выделены серым фоном.

В качестве интегрированной характеристики оптимальности пороговых функций примем среднее значение коэффициента оптимальности, которое вычисляется для каждой пороговой функции по всем уровням шума измерения и всем сигналам (таких сочетаний 12), т. е.

$$\bar{k}_z = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} k_z^{(m)},$$

где $k_z^{(m)}$ - значение коэффициента оптимальности для m - го сочетания уровня шума измерения и вида сигнала (берется из Табл. 1, 2). Результаты вычислений приведены в Таблице 3.

Таблица 1

Пороговая функция	Фильтруемый сигнал	Относительный уровень шума		
		0,015	0,05	0,15
$T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$	<i>Doppler</i>	0,998	0,998	1,000
	<i>Rectangular</i>	0,994	0,997	0,999
$T_{COM}(\tilde{d}, \lambda, \alpha)$	<i>Doppler</i>	0,952	0,952	0,959
	<i>Rectangular</i>	0,964	0,968	0,999
$T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$	<i>Doppler</i>	1,000	1,000	1,000
	<i>Rectangular</i>	1,000	1,000	1,000
$T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C)$	<i>Doppler</i>	0,993	0,996	0,994
	<i>Rectangular</i>	0,998	0,998	0,999

Таблица 2

Пороговая функция	Фильтруемое изображение	Относительный уровень шума		
		0,015	0,05	0,15
$T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$	<i>LENA</i>	1,000	1,000	0,986
	<i>TANGER</i>	0,994	0,993	0,993
$T_{COM}(\tilde{d}, \lambda, \alpha)$	<i>LENA</i>	0,983	0,912	0,890
	<i>TANGER</i>	0,995	0,995	0,901
$T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$	<i>LENA</i>	0,977	0,987	1,000
	<i>TANGER</i>	1,000	1,000	1,000
$T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C)$	<i>LENA</i>	0,991	0,993	0,991
	<i>TANGER</i>	0,994	0,992	0,993

Таблица 3

Пороговая функция	Среднее значение коэффициента оптимальности
$T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$	0,996
$T_{COM}(\tilde{d}, \lambda, \alpha)$	0,955
$T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$	0,998
$T_{TH}(\tilde{d}, \lambda, C)$	0,991

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ значений коэффициента оптимальности k_z , приведенных в этих двух таблицах, позволяет сделать следующие выводы:

1. Максимальные значения $k_z = 1$ (а следовательно, и наименьшую ошибку фильтрации) при фильтрации одномерных дискретных сигналов имеет пороговая функция $T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$. Немного меньшие значения коэффициента оптимальности имеет пороговая функция $T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$.

2. Максимальные значения коэффициента оптимальности при фильтрации изображений имеют разные пороговые функции и это зависит от уровня шума и изображения (наиболее предпочтительной является пороговая функция $T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$).

3. Анализ средних значений коэффициентов оптимальности, приведенных в таблице 3, позволяет рекомендовать в качестве оптимальной пороговой функции функцию $T_{HEB}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$ - она имеет максимальное среднее значение \bar{k}_z коэффициента оптимальности. Приемлемой альтернативой является функция $T_{SS}(\tilde{d}, \lambda_1, \lambda_2)$.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ю.Е. Воскобойников. Вейвлет-фильтрация с двухпараметрическими пороговыми функциями: выбор функции и оценивание оптимальных параметров. Автоматика и программная инженерия. 2016, №1(15)
- [2] В. П. Дьяконов. Вейвлеты. От теории к практике. В. П. Дьяконов. М.: СОЛОМОН-Р, 2002. – 448 с.
- [3] Н. К. Смоленцев. Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MatLAB. Н. К. Смоленцев. М.: ДМК, 2005. 304 с.
- [4] Н.М. Астафьев. Вейвлет-преобразования. Основные свойства и примеры применения. Н.М. Астафьева. М.: ИКИ РАН, 1994. № 1891. 56 с.
- [5] S.Mallat. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$. Trans. AMS. 1989. Vol. 315, № 1. P. 69–87.
- [6] S.Mallat. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1989. Vol. 11, № 9. P. 674–693.
- [7] Ю. Е. Воскобойников. Вейвлет-фильтрация сигналов и изображений (с примерами в MathCAD): монография. Новосибирск: ИГАСУ (Сибстрин), 2015. – 188 с.
- [8] A. G. Bruce, H.-Y. Gao. Waveshrink with firm shrinkage. Statistica Sinica. 1997. Vol. 4, № 6. P. 855–874.
- [9] B.Vidakovic. Statistical modeling by wavelets. Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons Inc., 1999. – 365 p.

- [10] H.-Y. Gao. Wavelet shrinkage denoising the non-negative garrote. Journal of Computational and Graphical Statistics. 1998. V. 7, № 4. P. 469–488.
- [11] У.Прэтт. Цифровая обработка изображений. Т.1. М.: Мир, 1982. 312 с.
- [12] Ю. Е. Воскобойников, А. В. Гочаков. Построение алгоритмов вейвлет-фильтрации с двухпараметрическими пороговыми функциями. Автометрия. 2012. Т. 48, № 1. С. 17–29. (Yu. E. Voskoboinikov, A. V. Gochakov. Construction of a wavelet-filtration algorithms with two-parametrical threshold functions. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. Vol. 48, № 1. P. 17–27).

Selection of the Best Two-Parameter Threshold Function in the Algorithms of Wavelet Filtering

YU.E. VOSKOBOINIKOV, D.A. KRISOV

Abstract: Most of the used wavelet filtering algorithms are threshold nature: expansion coefficient smaller absolute value of a threshold value becomes zero, otherwise the coefficient is subjected to some (often nonlinear) transformation, which is given by the threshold function is used. Currently, two-parameter threshold functions used to a certain extent without shortcomings inherent in traditional single-parameter threshold functions. It proposed in the literature several such functions, but there are no comprehensive studies influence on the function type error threshold wavelet filter, which makes use of such reasonable threshold functions in practice. The work carried out original research of influence of the four types of functions on a one-dimensional filtering error signals and images at different levels of measurement noise. We introduce the optimal ratio, which allows to objectively compare different threshold functions. Based on the analysis of this factor provides practical guidance on the application of the best (optimal) threshold functions.

Key words: wavelet representation of signals, threshold algorithm of wavelet filtering, threshold function, one-parameter threshold functions, optimality ratio threshold functions, the best threshold function

REFERENCES

- [1] Ju.E. Voskobojnikov. Veyvlet-fil'tracija s dvuhparametricheskimi porogovymi funkcijami: izbor funkcii i ocenivanie optimal'nyh parametrov. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2016, №1(15)
- [2] V. P. D'jakonov. Veyvlety. Ot teorii k praktike. V. P. D'jakonov. M.: SOLOMON-R, 2002. – 448 s.
- [3] N. K. Smolencev. Osnovy teorii veyvletov. Veyvlety v MatLAB. N. K. Smolencev. M.: ДМК, 2005. 304 s.
- [4] N.M. Astaf'ev.a Veyvlet-preobrazovanija. Osnovnye svoystva i primery primenenija. N.M. Astaf'eva. M.:

- IKI RAN, 1994. № 1891. 56 s.
- [5] S.Mallat. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$. Trans. AMS. 1989. Vol. 315, № 1. P. 69–87.
- [6] S.Mallat. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Trans. Pattern Anal. Machine Intell. 1989. Vol. 11, № 9. P. 674–693.
- [7] Ju. E. Voskoboynikov. Vevvlet-fil'tracija signalov i izobrazhenij (s primerami v MathCAD): monografija. Novosibirsk: NGASU (Sibstrin), 2015. – 188 s.
- [8] A. G. Bruce, H.-Y. Gao. Waveshrink with firm shrinkage. Statistica Sinica. 1997. Vol. 4, № 6. P. 855–874.
- [9] B.Vidakovic. Statistical modeling by wavelets. Wiley series in probability and statistics. John Wiley & Sons Inc., 1999. – 365 p.
- [10] H.-Y. Gao. Wavelet shrinkage denoising the non-negative garrote. Journal of Computational and Graphical Statistics. 1998. V. 7, № 4. P. 469–488.
- [11] U.Prjett. Cifrovaja obrabotka izobrazhenij. T.1. M.: Mir, 1982. 312 s.
- [12] Yu. E. Voskoboynikov, A. V. Gochakov. Construction of a wavelet-filtration algorithms with two-parametrical threshold functions. Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. Vol. 48, № 1. P. 17–27.



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 автоматки НГТУ. Автор более 290 публикаций, 6 монографий, посвященных решению некорректных задач интерпретации данных и обработке сигналов и изображений и большого числа учебных пособий. voscob@mail.ru

Крысов Данила Алексеевич, аспирант кафедры автоматки факультета автоматки и вычислительной техники НГТУ. tamahouk@sibnet.ru

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

Содержание раздела:

- Г.А. Французова. Научная школа А.С. Вострикова. К юбилею основателя. НГТУ, ИЛФ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 101–109.
- В.А. Жмудь. Научная школа С.Н. Багаева. К юбилею основателя. НГТУ (Новосибирск, Россия). Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 110–125.

Научная школа профессора А.С. Вострикова. К юбилею основателя

Галина Французова
ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск

Аннотация: В статье представлены некоторые результаты развития методов управления линейными и нелинейными объектами, разработанными в рамках научной школы «Синтез систем автоматического регулирования». Статья посвящена юбилею основателя научной школы Анатолия Сергеевича Вострикова.

Ключевые слова: принцип локализации, нелинейный объект, алгоритм управления, экстремальное регулирование, адаптивные системы, дифференцирующий фильтр

ВВЕДЕНИЕ

В нынешнем году, 28 мая, исполнилось 75 лет основателю научной школы «Синтез систем автоматического регулирования» (см. [1]) профессору, доктору технических Анатолию Сергеевичу Вострикову.

Известный ученый в области теории автоматического управления, А.С. Востриков является основателем оригинального направления исследований в области синтеза линейных и нелинейных систем с помощью ряда методик, основанных на принципе локализации [2]. Под его руководством подготовлено и защищено 30 кандидатских диссертаций, он являлся научным консультантом у восьми исследователей, защитивших по итогам этих работ докторские диссертации.

Одновременно с этим исполняется 50 лет кафедре Автоматики НГТУ, заведующим этой кафедрой этой кафедрой Анатолий Сергеевич был дважды: с 1971 по 1972 г. и с 1993 по 2009 г.

Кроме того, в 2016 году исполняется 35 лет работы периодического научного семинара «Синтез систем управления», организатором и бессменным руководителем которого является Анатолий Сергеевич.

Деятельность научной школы А.С. Вострикова тесно связана с научными специальностями «Элементы и устройства систем автоматики», «Управление в технических системах», «Робототехника» и нескольких других. Особую любовь профессора А.С. Вострикова заслужили исследования, связанные с управлением электроприводом. Под его руководством постоянно и эффективно действует диссертационный совет Д.212.173.04 [3] по следующим специальностям:

05.09.01 - Электромеханика и электрические

аппараты,

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы,

05.09.10 - Электротехнология.



Под руководством А.С. Вострикова защищены диссертации следующих исследователей, многие из которых продолжают работать в НГТУ: профессор В.Н. Аносов, профессор А.А. Воевода, профессор Г.А. Французова, профессор В.Д. Юркевич, профессор О.Я. Шпилева, профессор В.А. Жмудь, профессор Г.М. Симаков, профессор В.В. Панкратов, доцент О.В. Нос, доцент Е.В. Гаврилов, доцент Е.Л. Веретельникова, доцент Г.П. Голодных, доцент В.С. Мучкин, доцент Г.В. Саблина, доцент А.В. Суворов, профессор А.В. Чехонадских, доцент А.Л. Соловьев, доцент Е.А. Зима и многие другие.

Востриков Анатолий Сергеевич – лауреат Премии Президента Российской Федерации в области образования, заслуженный деятель науки РФ, заслуженный профессор НГТУ, почетный профессор Шанхайского университета, почетный профессор Алтайского государственного технического университета, награжден орденом Почета.

Коллектив кафедры Автоматики сердечно поздравляет Анатолия Сергеевича и желает ему успеха, здоровья и дальнейших свершений в развитии автоматики, робототехники, автоматизации и информационных технологий.

1. ОСНОВЫ ПРИНЦИПА ЛОКАЛИЗАЦИИ И ЕГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ

Разработанный в рамках научной школы А.С. Вострикова принцип локализации [2, 4] ориентирован на синтез высококачественных систем управления сложными динамическими объектами с переменными характеристиками, функционирующих в условиях полной или частичной неопределенности их параметров.

Суть предложенного принципа состоит в организации в замкнутой системе специального «быстрого» контура, в котором локализуется и парируется регулятором влияние неконтролируемых внешних возмущений, нестационарных параметров и нелинейных характеристик объекта. Организация внутреннего контура достигается за счет использования вектора скорости изменения переменных состояния и большого коэффициента в законе управления, что позволяет формировать желаемые динамические свойства в системе при неполной информации об объекте [5].

На базе принципа локализации были разработаны новые методы синтеза систем автоматического регулирования в условиях неопределенности: метод старшей производной для одноканальных систем регулирования и метод вектора скорости для многоканальных систем. [6–10]. В дальнейшем эти методы были развиты в соответствующие методы синтеза новых типов регуляторов для отдельных классов динамических систем: адаптивных и дискретных систем, систем экстремального регулирования [11–15].

Заложены основы новой высокоэффективной теории синтеза оптимальных алгоритмов векторного автоматического управления сложными нелинейными и нестационарными электромеханическими объектами, в основу которой положены метод непрерывной иерархии каналов регулирования и принципы адаптивного управления с идентификацией [16 - 18].

Были разработаны теоретические основы построения многоканальных систем с переменной структурой и адаптивной настройкой многомерных регуляторов для динамических объектов с переменными параметрами. В этих системах реализован принцип централизованного векторного управления, основанный на формировании режимов одновременного согласованного скольжения во всех каналах управления по пересечению многомерных гиперповерхностей в пространстве координат системы. Сформулированы и строго доказаны необходимые и достаточные условия возникновения, существования и устойчивости указанных режимов скольжения при значительных изменениях параметров объектов

управления и внешних воздействий в условиях существенного взаимовлияния между всеми степенями свободы систем высокого порядка, а также при наличии ограничений мощности исполнительных механизмов и неидеальностей переключающего устройства [19, 20].

Рассмотрена задача синтеза регуляторов для класса объектов, модель которых представляет собой последовательное соединение двух составляющих: динамической части и статической функции качества с выраженным экстремумом [11, 21]. Получены условия разрешимости задачи синтеза, особенности формирования заданных движений и условия инвариантности к действию внешних возмущений и нестационарности параметров динамической части [22]. Отличительной особенностью разрабатываемого метода синтеза является применение двух видов обратных связей. В соответствии с методом локализации вводятся обратные связи по производным динамической части объекта, что позволяет иметь текущую оценку всех возмущений и парировать их влияние. С целью автоматического движения к экстремуму в законе управления используется градиент функции качества. Разработаны несколько вариантов организации автоматических систем поиска экстремума, соответствующих особенностям объекта управления [23, 24]. Для одноканальных объектов невысокого порядка предложено синтезировать одноконтурные системы экстремального регулирования. Для объектов произвольного порядка рекомендовано организовывать двухконтурные системы, в которых внутренний контур включает в себя динамическую часть объекта, а внешний – его экстремальную характеристику. Предложено регулятор внутреннего контура формировать на основе метода локализации. В этом случае синтез двухконтурной нелинейной нестационарной системы экстремального регулирования сводится к задаче расчета «эквивалентной» линейной системы стабилизации с применением процедуры модального метода [25 - 28].

На основе аппарата дифференциальных уравнений разработан метод синтеза адаптивных систем управления сложными многосвязными нелинейными динамическими объектами в условиях быстрых изменений их параметров в большом диапазоне [29].

Для адаптивных систем с переменной структурой и с эталонными моделями важным является вопрос размерности, которая определяется особенностями и порядками объектов управления, наблюдателя, адаптора. В условиях существенной нестационарности характеристик объекта управления изменение размерности наблюдателя относительно размерности объекта может привести к ухудшению качества процессов управления и даже к потере устойчивости. Разработанные на

основе метода локализации адаптивные системы имеют регуляторы с минимальным количеством контуров настройки коэффициентов, что позволяет эффективно подавлять неконтролируемые возмущения и обеспечивать требуемое качество управления в различных режимах работы рассматриваемых систем и устройств [30–33].

Научная ценность проводимых работ обусловлена тем фактом, что задача синтеза систем управления, свойства которых инвариантны по отношению к переменным параметрам объекта и внешним возмущениям, является одной из сложнейших и важнейших проблем современной теории и практики автоматического управления.

К настоящему времени на основе метода локализации разработаны конкретные методики расчета систем с требуемыми динамическими свойствами и показателями качества для класса объектов, функционирующих в условиях ограниченного ресурса управляющих воздействий и неопределенности параметров при действии внешних неконтролируемых возмущений. При этом получены условия локализации параметрических и сигнальных возмущений, а также условия реализуемости желаемых движений на выходе системы автоматического регулирования [2, 5, 22, 32, 34, 35].

Практическая реализация разработанных алгоритмов управления предполагает возможность оценки производных выходной переменной объекта (включая старшую производную) с помощью специальной динамической подсистемы, так называемого дифференцирующего фильтра. Помимо собственно дифференцирования такое устройство должно обеспечивать фильтрацию высокочастотных помех измерения. В зависимости от уровня этих помех предложена структура дифференцирующих устройств и рекомендации по расчету их параметров [36–38].

2. ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЙ ПРИНЦИПА ЛОКАЛИЗАЦИИ

Характерными примерами практического использования алгоритмов управления, основанных на методе локализации, являются следующие сложные динамические системы, функционирующие в условиях неопределенности параметров объекта.

Система стабилизации дуги дуговой сталеплавильной печи, которая предназначена для преобразования электрической энергии в тепловую посредством мощного дугового разряда между электродом и расплавляемым металлом [39, 40].

Система стабилизации положения электромагнитного подвеса, включающая в себя электромагнитный исполнительный механизм [41, 42].

Системы управления сложными непрерыв-

ными и дискретно-непрерывными электромеханическими объектами при ограниченных энергетических ресурсах находятся на этапе внедрения в производство [43–46]. Лабораторные исследования вновь синтезируемых алгоритмов оптимального управления осуществляются на специально для этой цели созданной экспериментальной установке, находящейся на кафедре ЭАПУ Новосибирского государственного технического университета, экспериментальном стенде Отдела мехатронных систем НГТУ, в испытательной лаборатории ЗАО «ЭРАСИБ».

Система стабилизации объектов типа «перевернутый маятник» [47–50]. Такие объекты можно рассматривать как успешные лабораторные идеализации неустойчивых механических систем.

Система управления безредукторным электромеханическим усилителем руля автомобиля с торсионным датчиком скручивающего момента на рулевом колесе [50–51].

Подготовлен и исследован макетный образец высокоточной двухплоскостной системы стабилизации оптической линии визирования для подвижных наземных объектов [52].

В последние годы ведутся работы по настройке регулятора газоздушного тракта на основе принципа локализации [53–55], а также рассматривается возможность управления выходным нагревателем прямооточного котла угольной электростанции [56–58].

3. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАПРАВЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С ПРИНЦИПОМ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Текущее состояние и перспективы развития задачи синтеза регуляторов для существенно нелинейных нестационарных объектов подробно исследовано в работах [59, 60]. В них показано, что решающим фактором эффективности регуляторов для нелинейных объектов является использование глубокой обратной связи по производным выходной переменной. В совокупности с коэффициентом усиления регулятора это позволяет обеспечить локализацию внешних возмущений и сформировать в системе требуемые динамические свойства.

Предполагается, что основное содержание работ по развитию этого подхода на ближайшее время составят: методы синтеза систем экстремального регулирования с заданными динамическими свойствами и особенности цифровой реализации регуляторов с вектором скорости в обратной связи.

В рамках выполнения научных исследований будут разработаны процедуры расчета экстремальных регуляторов с учетом ограничений на состояние и ресурс управления объекта, наличие дрейфа экстремума, помех измерения и требований, предъявляемых к

процессам в замкнутой системе.

При этом ожидается получить новые результаты в теории синтеза систем автоматического управления, функционирующих в условиях неопределенности параметров объекта, а также комплексные рекомендации по применению разработанных законов управления в системах автоматизированного электропривода переменного тока, разработанные на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Полученные новые результаты научных исследований будут представлены в кандидатских и докторских диссертациях, использованы при подготовке специалистов высшей квалификации, обучающихся в аспирантуре по специальностям 09.06.01 - Информатика и вычислительная техника и 27.06.01 - Управление в технических системах.

Они также найдут отражение и в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 270000: планируется участие студентов в рамках выполнения курсового проектирования и подготовки магистерских диссертаций.

Отдельные результаты исследований будут опубликованы как в научной, так и в учебной литературе по проблемам синтеза систем управления.

Разработанные методики синтеза автоматических систем, функционирующих в условиях неопределенности параметров объекта и неконтролируемых внешних возмущений, могут быть использованы в различных проектных, технологических, научных и учебных организациях Сибирского и Дальневосточного регионов при разработке новых систем автоматического управления сложными динамическими объектами и технологическими процессами (в частности, при разработке микропроцессорных регуляторов для объектов химической, нефтехимической промышленности), для управления сложными подвижными объектами (подводными аппаратами, роботами и многозвенными манипуляторами), гидравлическими и электромеханическими устройствами, при создании высокоточных систем наведения бортовых систем управления и навигации в летательных аппаратах и в ряде других объектов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном кратком обзоре мы попытались дать представление о характере и масштабе научных исследований, проводимых в рамках научной школы «Синтез систем автоматического регулирования». Конечно, в одной статье невозможно описать весь спектр работ, проведенных с 1971 года, да авторы и не ставили такую задачу. Заинтересованный читатель по указанным ссылкам всегда может

найти подробную информацию как о самом методе локализации, так и о различных сферах его применения.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сайт НГТУ: Научные школы http://www.nstu.ru/science/schools/schools_info?id=739
- [2] Востриков А.С. Синтез систем регулирования методом локализации. – Новосибирск: НГТУ. 2007.
- [3] Сайт НГТУ: Диссертационный совет http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertations?id=121
- [4] Востриков А.С. Задача синтеза в теории регулирования. – Новосибирск: НГТУ. 2011.
- [5] Востриков А.С. Старшая производная и большие коэффициенты в задаче управления нелинейными нестационарными объектами. Мехатроника, автоматизация, управление. - 2008. № 5. С. 2-7.
- [6] Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. Systems with state vector derivative in the control. Automation and Remote Control. 1982. Vol. 43. № 3. P.283-286.
- [7] Vostrikov A.S., Yurkevich V.D. The decoupling of multi-channel non-linear time-varying systems by derivative feedback. Systems Science; Wroclaw, Poland. – 1991. V. 17. № 4. P.21-33.
- [8] Востриков А.С., Юркевич В.Д. Синтез многоканальных систем с вектором скорости в законе управления. Автоматика и телемеханика. - 1993. № 2. С. 51-64.
- [9] Vostrikov A.S., Yurkevich V.D. Design of control systems by means of localisation method. Proc. of 12-th IFAC World Congress (18-23 July 1993), Sydney, Australia. – 1993. V.8. P.47-50.
- [10] Востриков А.С., Французова Г.А. Проблема стабилизации многоканальных нелинейных нестационарных объектов. Авиакосмическое приборостроение. - 2004. № 4. С. 18-22.
- [11] Востриков А.С., Французова Г.А. Экстремальные и оптимальные системы автоматического управления. Новосибирск: Изд-во НГТУ. 2001. 64 с.
- [12] Востриков А.С., Воевода А.А., Мучкин В.С., Клевакин В.Н. Дискретные системы автоматического управления на основе принципа локализации: Учеб. Пособие. - Новосибирск: НЭТИ. 1990. 74с.
- [13] Yurkevich V.D. Robust Two-Time-Scale Discrete-Time System Design. Proc. of the 14th IFAC World Congress, Beijing, China. – 1999. V.G. P. 343- 348.
- [14] Vostrikov A.S., Shilevaya O.Ya. Nonlinear control systems with fast adaptive algorithm. Proc. of the IASTED intern. conf. On modeling, identification and control (MIC 2004), Switzerland, Grindelwald, 23-25 Febr. 2004. – 2004. P. 444-449.
- [15] Востриков А.С., Карчов М.С., Юркевич В.Д. Вопросы синтеза систем управления для объектов с распределенными параметрами на основе метода локализации. Автоматическое управление объектами с переменными характеристиками: межвуз. сб. науч. тр. – Новосибирск. 1990. С. 3- 16.
- [16] Панкратов В.В. Метод синтеза робастных алгоритмов управления на основе адаптивных обратных моделей. Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. трудов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ. - 2008. С. 14 – 27.

- [17] Нос О.В., Панкратов В.В. Оптимизация алгоритмов векторного управления асинхронным электроприводом на основе метода непрерывной иерархии. *Электричество*. – 2000. №6. С. 48–53.
- [18] Котин Д.А., Панкратов В.В. Синтез алгоритмов текущей идентификации координат асинхронизированного синхронного электропривода. *Электромеханические преобразователи энергии: Материалы IV Международной науч.-техн. конф.*, 13 – 16 октября 2009 г. - Томск: ТПУ. 2009. С. 228 – 232.
- [19] Панкратов В.В., Нос О.В. Алгоритмы управления асинхронными электроприводами в режимах токоограничения. *Электротехника*. – 2000. №11. С. 23–25.
- [20] Вылцан А.С. Синтез и оптимизация системы векторного управления асинхронным двигателем, малочувствительной к изменениям параметров. *Автоматизированные электромеханические системы: сб. науч. тр.* – Новосибирск: НГТУ. 2008. С. 90 – 100.
- [21] Востриков А.С., Французова Г.А. Теория автоматического регулирования (2-е изд.). – М.: Высшая школа. 2006.
- [22] Французова Г.А. Об условиях разрешимости задачи синтеза автоматической системы экстремального управления. *Научный вестник НГТУ*. - 2001. № 2. С. 3 – 9.
- [23] Французова Г.А. Синтез двухконтурной астатической системы экстремального регулирования на основе принципа локализации. *Сибирский журнал индустриальной математики*. - 2004. Т. VII. № 1 (17). С. 145-150.
- [24] Французова Г.А. Свойства различных типов систем автоматического поиска экстремума, основанных на методе локализации. *Автоматрия*. 2012. Т. 48. № 5. С. 438-446.
- [25] Frantsuzova G.A. Design of Two-Loops Extremum Seeking System by means of Localization Method. *Proc. of the IASTED intern. conf. «Automation, Control and Information Technology (ACIT-2005)»*. - 2005. P.415 – 419.
- [26] Французова Г.А. Двухконтурные системы экстремального регулирования с предварительной стабилизацией динамической части. *Автоматрия*. - 2006. № 2. С. 29 – 37.
- [27] Французова Г.А. Двухконтурные системы экстремального регулирования с формированием заданной динамики. *Мехатроника, автоматизация, управление*. - 2008. № 5. С. 7 – 11.
- [28] Французова Г.А., Прушенова Л.В. Исследование устойчивости систем экстремального регулирования с запаздыванием. *Науч. вестник НГТУ*. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – № 1(34). – С. 223-228.
- [29] А.с. 1191883 СССР, МКИ G 05 B 13/02. Система управления нестационарными объектами. Востриков А.С., Шпилева О.Я. Открытия. Изобретения. – 1985. № 42. С.188.
- [30] Шпилева О.Я. Об одном способе уменьшения порядка адаптивного регулятора. *Автоматрия*. - 2006. Т.42. № 2. С. 38-48.
- [31] Шпилева О.Я., Иваненко Е.В. Особенности использования нескольких эталонных моделей в адаптивной системе управления. *Автоматрия*. - 2008. № 1. С. 59-69.
- [32] Шпилева О.Я. Формирование управляющих воздействий в системах прямого адаптивного управления. *Автоматрия*. - 2009. Т. 45. № 5. С. 90-102.
- [33] Shpilevaya O. Adaptive Control System with Piece-Wise Perturbations. *Preprints of 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing*. Moscow. 3-5 June. - 2009. P. 361-366.
- [34] Pankratov V.V., Nos O.V. Optimal control laws of induction electric drive in the nonlinear modes. *KORUS 99. The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology*, June 22–25, at Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia: abstracts. – Novosibirsk, 1999. V.2. P. 802.
- [35] Востриков А.С., Панкратов В.В. О грубости систем с глубокими обратными связями. *Электротехника*. - 2000. № 11. С 3-6.
- [36] Востриков А.С., Гаврилов Е.Б. Об одном способе дифференцирования в присутствии помех. элементы и устройства автоматики и вычислительной техники: сб.науч.тр. - Новосибирск: НЭТИ. 1976. С 17-21.
- [37] А.с. 568952 СССР, МКИ G 06 g 7/18. Устройство для многократного дифференцирования аналоговых сигналов. А.С. Востриков, Е.Б. Гаврилов. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки. – 1977. № 30. С. 125.
- [38] А.с. 817728 СССР, МКИ G 06 g 7/18. Аналоговое устройство для оценки частной производной. А.С. Востриков, С.М. Хачатурова, Е.Б. Гаврилов, А.Б. Гаврилов. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки. – 1981. № 12. С. 208.
- [39] Совершенствование систем стабилизации электрического режима ДСП с гидроприводом на основе принципа локализации. А.С.Востриков, Е.Б. Гаврилов, Э.Ф. Курганов, В.П. Кульченко, В.И. Госман, А.Ф. Иноземцев. *Электротехническая промышленность. Электротермия*. – 1984. Вып 5 (255). С. 5-7.
- [40] А.с. 944169 СССР, МКИ H 05 b 7/148, F 27 d 11/10. Устройство управления электрическим режимом горения ДСП / А.С. Востриков, Э.Ф. Курганов. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки. – 1982. № 26. С. 304.
- [41] Востриков А.С., Крапивин В.С. К синтезу инвариантной системы стабилизации электромагнитного подвеса. *Известия вузов. Электромеханика*. 1985. № 2. С. 67-73.
- [42] А.с. 974865 СССР, МКИ G 05 d 19/02. Устройство для управления электромагнитной подвеской. А.С. Востриков, В.С. Крапивин. Открытия, изобретения, промышленные образцы и товарные знаки. – 1982. № 42.
- [43] Аносов В.Н., Востриков А.С., Кавешников В.М. Параметрическая оптимизация силового фильтра в тяговом электроприводе автономного транспортного средства. *Электричество*. 2007. № 8. С. 8-12.
- [44] Пат. 2210171 RU МПК H 02 P 6/00, H 02 P 6/16, H 02 K 29/08 Способ управления синхронным электродвигателем с возбуждением от постоянных магнитов [электронный ресурс] Б.М.Боченков, Н.А. Болян, А.Г. Судак, А.С.Востриков. – Заяв. 28.09.2001; опубл. 10.08.2003. – Режим доступа: <http://www.fips.ru/cdfi/fips>.
- [45] Панкратов В.В., Котин Д.А. Принципы векторного управления и алгоритмы ориентирования по полю в асинхронизированном

- синхронном электроприводе. Мехатроника. Автоматизация. Управление. - 2009. № 12. С 18-25.
- [46] Вдовин В.В., Котин Д.А., Панкратов В.В. Адаптивный алгоритм вычисления координат для бездатчикового векторного управления машинами двойного питания. Известия высших учебных заведений. Электромеханика. - 2013.- № 6. С. 23-27.
- [47] Востриков А.С., Суворова Г.В. О стабилизации системы «перевернутый маятник». Сборник научных трудов НГТУ. 1997. № 1(6). С. 41-46.
- [48] Саблина Г.В., Ходакова Д.И. Разработка алгоритма стабилизации системы «подвешенный груз». Сборник научных трудов НГТУ. – 2009. № 3(57). С. 33–40
- [49] Саблина Г.В. Об одном подходе к синтезу модельной системы «подвешенный груз». Труды 12 междунар. конф Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП–2014), Новосибирск, 2–4 окт. 2014 г. – 2014. Новосибирск: Изд-во НГТУ. Т.7. С. 68-71.
- [50] Никулин Г.Л., Французова Г.А. Система управления для электромеханического усилителя рулевого управления автомобиля. Мехатроника, автоматизация, управление. - 2006. № 8. С. 23-28.
- [51] Никулин Г.Л., Французова Г.А. Синтез системы регулирования электромеханического усилителя руля автомобиля. Автометрия. - 2008. № 5. С. 93-99.
- [52] Шендрик Д.А., Французова Г.А. Подход к комплексному моделированию управляемой системы стабилизации оптической линии визирования. Мехатроника, автоматизация, управление. - 2008. - № 9. - С.24-28.
- [53] Востриков А.С., Мальцев А.С. Параметрическая стабилизация давления. Научный вестник НГТУ. – 2009. № 4 (37). С.3-10.
- [54] Vostrikov A.S., Maltsev A.S. Parametric pressure control in direct injection gasoline engine. Proc. of the international forum on strategic technologies (IFOST 2009). Vietnam, Ho Chi Minh City, 21-23 Oct 2009. 2009. Sess.1. P. 162-165.
- [55] Востриков А.С., Пономарев А.А. Метод настройки регулятора газозвоздушного тракта на основе принципа локализации. Автометрия - 2012. Т. 48. № 5. С.58 - 65
- [56] Суворов Д.А., Французова Г.А., Востриков А.С. Синтез системы управления выходным нагревателем прямоточного котла угольной электростанции. Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. - 2015. № 1 (26). С. 94-10.
- [57] Suvorov D.A., Frantsuzova G.A., Zemtsov N.S. Using the Localization Method for Once-through Boiler Control. Proceedings of 9th International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015), Russia, Omsk, May 21–23, 2015. – Omsk: Omsk State Technical University. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2., электронный ресурс.
- [58] Земцов Н. С., Французова Г.А. Синтез ПИД регулятора для системы управления прямоточным котлом. Мехатроника, автоматизация, управление. – 2015. Т.16. № 9. С. 631 — 636.
- [59] Востриков А. С. Проблема синтеза регуляторов для систем автоматики: состояние и перспективы. Автометрия - 2010. Том 46. № 2. С.3-19.
- [60] Востриков А.С., Французова Г.А. Синтез PID-регуляторов для нелинейных нестационарных объектов. Автометрия. – 2015, № 5. С. 53-60.
- [61] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2541684. Заявка № 2013146115, приоритет от 15.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 15 января 2015 г. Срок действия патента истекает 25.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 5.
- [62] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2566339. Приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 20 октября 2015 г. Бюлл. № 29. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36.
- [63] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2584925. Приоритет от 05.03.15. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 27.04.16. Бюллетень № 14. Срок действия патента истекает 05.03.35. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, G01P 3/36.
- [64] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Регулятор для систем с обратной связью. Патент РФ RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Опубл.27.09.08. Бюл. № 27. Заявка № 2008108410/22 от 04.03.2008, правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [65] В.А. Жмудь, О.Д. Ядрышников. Оптимизация регулятора для многоканальных объектов с развитием идеи упреждителя Смита. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1 (7). С. 57–67.
- [66] В.А. Жмудь. Система с обратной связью. Патент на изобретение № 2540461. Заявка № 2013145173, приоритет от 08.10.2013. Зарегистрировано в государственном реестре изобретений РФ 19 декабря 2014 г. Срок действия патента истекает 08.10.2033. Правообладатель ФГБОУ ВПО НГТУ. МПК G01R 23/02, 3/36. Бюлл. № 4.
- [67] Пат. 2554291, МПК G01R 23/02, G01P 3/36. Структура модели для оптимизации системы с обратной связью / В. А. Жмудь, А. Н. Заворин; НГТУ - 2014112628; заяв. 01.04.14; опуб. 27.06.15. - 9 с.

**Scientific School of Professor
A.S. Vostrikov. On the Anniversary of
the Founder**

G.A. FRANTSUZOVA

Abstract: This year we celebrated the 75-years Anniversary of the leader of Science School “Automatic Control Systems Design” – Professor, Doctor of Technical Sciences Anatoly S. Vostrikov.

A well-known scientist in the field of control theory, Anatoly S. Vostrikov is the founder of the original research direction in the synthesis of nonlinear systems, called the “principle of localization.” He was supervisor of 8 professors and 19 associate professors who successfully defended their dissertations in this area.

At the same time we celebrate the 30 years of the City Science-Technical Seminar “Modern Problems of the Automatic Control”, which is

regularly lead under his leadership on the base of Novosibirsk State Technical University.

Science school “Automatic Control Systems Design” is closely connected with the specialty of the higher education of the department of Automation in NSTU and with the direction of the post-graduate education “Elements and devices of the Automatic Systems” registered in Higher Degree Council if the Russian Federation.

Accordingly, there is Dissertation Council under his presidency in NSTU, which takes to defend the dissertations on the specialties “Information-measuring and control systems” and “System analysis, management and information processing”. At the same time he is chairman of one more of the Dissertation Council, which takes to defend the dissertations on the specialties “Electrician and electrical equipment”, “Electrical Complexes and Systems” and “Electrotechnology”.

Under his science supervision, many scientists prepared and defended their dissertations.

Now the Science School “Automatic Control Systems Design” includes the following scientists, working in NSTU: Professor V.N. Anosov, head of Department of Electric and Automation of Industrial Plants, professors of the Department of Automation

A.A. Voevoda, G.A. Frantsuzova, V.D. Yurkevich, O.Ya. Shpilevaya, V.A. Zhmud (head of the Department of Automation); professor of the Department of Electric and Automation of Industrial Plants G.M. Simakov, V.V. Pankratov, deputy-professor O.V. Nos (head of Department of Automation of manufacturing processes in engineering), deputy-professors of the Department of Automation Ye.B. Gavrilov, Ye. L. Veretelnikova, G.P. Golodnikh, V.S. Muchkin, G.V. Sablina, G.P. Chikildin, A.A. Borovkov, A.V. Suvorov, A.V. Chekhonadskikh, A.L. Soloviev, Ye.A. Zima and many others.

The collective of the scientists of the Science school “Automatic Control Systems Design” warmly congratulates professor A.S. Vostrikov with the Anniversary and wishes him health and successes.

Kew words: localization principle, non-linear object, the control algorithm, the extreme regulation, adaptive systems, differentiating filter

REFERENCES

- [1] Sajt NGTU: Nauchnye shkoly http://www.nstu.ru/science/schools/schools_info?id=739
- [2] Vostrikov A.S. Sintez sistem regulirovaniya metodom lokalizatsii. – Novosibirsk: NGTU. 2007.
- [3] Sajt NGTU: Dissertatsionnyj sovet http://www.nstu.ru/science/dissertation_sov/dissertatsionnyj_sov?id=121
- [4] Vostrikov A.S. Zadacha sinteza v teorii regulirovaniya. – Novosibirsk: NGTU. 2011.
- [5] Vostrikov A.S. Starshaja proizvodnaja i bol'shie koefitsienty v zadache upravlenija nelinejnymi nestacionarnymi ob#ektami. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. - 2008. № 5. S. 2-7.
- [6] Vostrikov A.S., Utkin V.I., Frantsuzova G.A. Systems with state vector derivative in the control. Automation and Remote Control. 1982. Vol. 43. № 3. P.283-286.
- [7] Vostrikov A.S., Yurkevich V.D. The decoupling of multi-channel non-linear time-varying systems by derivative feedback. Systems Science; Wroclaw, Poland. – 1991. V. 17. № 4. P.21-33.
- [8] Vostrikov A.S., Jurkevich V.D. Sintez mnogokanal'nyh sistem s vektorom skorosti v zakone upravlenija. Avtomatika i telemekhanika. - 1993. № 2. S. 51-64.
- [9] Vostrikov A.S., Yurkevich V.D. Design of control systems by means of localisation method. Proc. of 12-th IFAC World Congress (18-23 July 1993), Sydney, Australia. – 1993. V.8. P.47-50.
- [10] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Problema stabilizatsii mnogokanal'nyh nelinejnyh nestacionarnykh ob#ektov. Aviakosmicheskoe priborostroenie. - 2004. № 4. C. 18-22.
- [11] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Jekstremal'nye i optimal'nye sistemy avtomaticheskogo upravlenija. Novosibirsk: Izd-vo NGTU. 2001. 64 s.
- [12] Vostrikov A.S., Voevoda A.A., Muchkin V.S., Klevakin V.N. Diskretnye sistemy avtomaticheskogo upravlenija na osnove principa lokalizatsii: Ucheb. Posobie. - Novosibirsk: NJeTI. 1990. 74s.
- [13] Yurkevich V.D. Robust Two-Time-Scale Discrete-Time System Design. Proc. of the 14th IFAC World Congress, Beijing, China. – 1999. V.G. R. 343- 348.
- [14] Vostrikov A.S., Shilevaya O.Ya. Nonlinear control systems with fast adaptive algorithm. Proc. of the IASTED intern. sonf. On modeling, identification and control (MIC 2004), Switzeland, Grindelwald, 23-25 Febr. 2004. – 2004. P. 444-449.
- [15] Vostrikov A.S., Karchov M.S., Jurkevich V.D. Voprosy sinteza sistem upravlenija dlja ob#ektov s raspredelennymi parametrami na osnove metoda lokalizatsii. Avtomaticheskoe upravlenie ob#ektami s peremennymi harakteristikami: mezhvuz.sb.nauch. tr. – Novosibirsk. 1990. S. 3- 16.
- [16] Pankratov V.V. Metod sinteza robustnykh algoritmov upravlenija na osnove adaptivnykh obratnykh modelej. Avtomatizirovannye jelektromehaničeskie sistemy: sb. nauch. trudov. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU. - 2008. S. 14 – 27.
- [17] Nos O.V., Pankratov V.V. Optimizacija algoritmov vektornogo upravlenija asinhronnym jelektroprivodom na osnove metoda nepreryvnoj ierarhii. Jelektričestvo. – 2000. №6. S. 48–53.
- [18] Kotin D.A., Pankratov V.V. Sintez algoritmov tekushhej identifikatsii koordinat asinhronizirovannogo sinhron-nogo jelektroprivoda. Jelektromehaničeskie preobrazovateli jenerгии: Materialy IV Mezhdunarodnoj nauch.-tehn. konf., 13 – 16 oktjabrja 2009 g. - Tomsk: TPU. 2009. S. 228 – 232.
- [19] Pankratov V.V., Nos O.V. Algoritmy upravlenija asinhronnymi jelektroprivodami v rezhimakh tokoogranichenija. Jelektrotehnika. – 2000. №11. S. 23–25.
- [20] Vylcan A.S. Sintez i optimizacija sistemy vektornogo upravlenija asinhronnym dvigatelem, malochuvstvitel'noj k izmenenijam parametrov. Avtomatizirovannye jelektromehaničeskie sistemy: sb. nauch. tr. – Novosibirsk: NGTU. 2008. S. 90 – 100.
- [21] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Teorija avtomaticheskogo regulirovaniya (2-e izd.). – M.: Vysshaja shkola. 2006.

- [22] Francuzova G.A. Ob uslovijah razreshimosti zadachi sinteza avtomaticheskoy sistemy jekstremal'nogo upravlenija. Nauchnyj vestnik NGTU. - 2001. № 2. S. 3 – 9.
- [23] Francuzova G.A. Sintez dvuhkonturnoj astaticheskoy sistemy jekstremal'nogo regulirovanija na osnove principa lokalizacii. Sibirskij zhurnal industrial'noj matematiki. - 2004. T.VII. № 1 (17). S. 145-150.
- [24] Francuzova G.A. Svojstva razlichnyh tipov sistem avtomaticheskogo poiska jekstremuma, osnovannyh na metode lokalizacii. Avtometrija. 2012. T. 48. № 5. S. 438-446.
- [25] Frantsuzova G.A. Design of Two-Loops Extremum Seeking System by means of Localization Method. Proc. of the IASTED intern. sonf. «Automation, Control and Information Technology (ACIT-2005)». - 2005. P.415 – 419.
- [26] Francuzova G.A. Dvuhkonturnye sistemy jekstremal'nogo regulirovanija s predvaritel'noj stabilizaciej dinamicheskoy chasti. Avtometrija. - 2006. № 2. S. 29 – 37.
- [27] Francuzova G.A. Dvuhkonturnye sistemy jekstremal'nogo regulirovanija s formirovaniem zadannoj dinamiki. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. - 2008. № 5. S. 7 – 11.
- [28] Francuzova G.A., Prushenova L.V. Issledovanie ustojchivosti sistem jekstremal'nogo regulirovanija s zapazdyvaniem. Nauch. vestnik NGTU. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2009. – № 1(34). – S. 223-228.
- [29] A.s. 1191883 SSSR, MKI G 05 V 13/02. Sistema upravlenija nestacionarnymi ob#ektami. Vostrikov A.S., Shpilevaja O.Ja. Otkrytija. Izobrenenija. – 1985. № 42. S.188.
- [30] Shpilevaja O.Ja. Ob odnom sposobe umen'shenija porjadka adaptivnogo reguljatora. Avtometrija. - 2006. T.42. № 2. C. 38-48.
- [31] Shpilevaja O.Ja., Ivanenko E.V. Osobennosti ispol'zovaniya neskol'kih jetalonnih modelej v adaptivnoj sisteme upravlenija. Avtometrija. - 2008. № 1. S. 59-69.
- [32] Shpilevaja O.Ja. Formirovanie upravljajushih vozdejstvij v sistemah prjamogo adaptivnogo upravlenija. Avtometrija. - 2009. T. 45. № 5. S. 90-102.
- [33] Shpilevaja O. Adaptive Control System with Piece-Wise Perturbations. Preprints of 13th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. Moscow. 3-5 June. - 2009. P. 361-366.
- [34] Pankratov V.V., Nos O.V. Optimal control laws of induction electric drive in the nonlinear modes. KORUS 99. The Third Russian-Korean International Symposium on Science and Technology, June 22–25, at Novosibirsk state technical university, Novosibirsk, Russia: abstracts. – Novosibirsk, 1999. V.2. P. 802.
- [35] Vostrikov A.S., Pankratov V.V. O grubosti sistem s glubokimi obratnymi svjazzjami. Jeletrotehnika. - 2000. № 11. S 3-6.
- [36] Vostrikov A.S., Gavrilov E.B. Ob odnom sposobe differencirovanija v prisutstvii pomeh. jelementy i ustrojstva avtomatiki i vychislitel'noj tehnik: sb.nauch.tr. - Novosibirsk: NJeTI. 1976. S 17-21.
- [37] A.s. 568952 SSSR, MKI G 06 g 7/18. Ustrojstvo dlja mnogokratnogo differencirovanija analogovyh signalov. A.S. Vostrikov, E.B. Gavrilov. Otkrytija, izobrenenija, promyshlennye obrazcy i tovarnye znaki. – 1977. № 30. S. 125.
- [38] A.s. 817728 SSSR, MKI G 06 g 7/18. Analogovoe ustrojstvo dlja ocenki chastnoj proizvodnoj.A.S. Vostrikov, S.M. Hachaturova, E.B. Gavrilov, A.B. Gavrilov. Otkrytija, izobrenenija, promyshlennye obrazcy i tovarnye znaki. – 1981. № 12. S. 208.
- [39] Sovershenstvovanie sistem stabilizacii jelektricheskogo rezhima DSP s gidroprivodom na osnove principa lokalizacii. A.S.Vostrikov, E.B. Gavrilov, Je.F. Kurganov, V.P. Kul'tenko, V.I. Gosman, A.F. Inozemcev. Jeletrotehnicheskaja promyshlennost'. Jeletrotermija. – 1984. Vyp 5 (255). S. 5-7.
- [40] A.s. 944169 SSSR, MKI H 05 b 7/148, F 27 d 11/10. Ustrojstvo upravlenija jelektricheskim rezhimom gorenija DSP / A.S. Vostrikov, Je.F. Kurganov. Otkrytija, izobrenenija, promyshlennye obrazcy i tovarnye znaki. – 1982. № 26. S. 304.
- [41] Vostrikov A.S., Krapivin V.S. K sintezu invariantnoj sistemy stabilizacii jelektromagnitnogo podvesa. Izvestija vuzov. Jeletromehaniika. 1985. № 2. S. 67-73.
- [42] A.s. 974865 SSSR, MKI G 05 d 19/02. Ustrojstvo dlja upravlenija jelektromagnitnoj podveskoj. A.S. Vostrikov, V.S. Krapivin. Otkrytija, izobrenenija, promyshlennye obrazcy i tovarnye znaki. – 1982. № 42.
- [43] Anosov V.N., Vostrikov A.S., Kaveshnikov V.M. Parametricheskaja optimizacija silovogo fil'tra v tjavom jelektroprivode avtonomnogo transportnogo sredstva. Jeletrichestvo. 2007. № 8. S. 8-12.
- [44] Pat. 2210171 RU MPK H 02 P 6/00, H 02 P 6/16, H 02 K 29/08 Sposob upravlenija sinhronnym jelektrodvigatelem s vobuzhdeniem ot postojannyh magnitov [jelektronnyj resurs] B.M.Bochenkov, N.A. Bolojan, A.G. Sudak, A.S.Vostrikov. – Zajav. 28.09.2001; opubl. 10.08.2003. – Rezhim dostupa: <http://www.fips.ru/cdfi/fips>.
- [45] Pankratov V.V., Kotin D.A. Principy vektornogo upravlenija i algoritmy orientirovanija po polju v asinhronizirovannom sinhronnom jelektroprivode. Mehatronika. Avtomatizacija. Upravlenie. - 2009. № 12. S 18-25.
- [46] Vdovin V.V., Kotin D.A., Pankratov V.V. Adaptivnyj algoritm vychislenija koordinat dlja bezdatchikovogo vektornogo upravlenija mashinami dvojnogo pitaniija. Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Jeletromehaniika. - 2013.- № 6. S. 23-27.
- [47] Vostrikov A.S., Suvorova G.V. O stabilizacii sistemy «perevernutyj majatnik». Sbornik nauchnyh trudov NGTU. 1997. № 1(6). S. 41-46.
- [48] Sablina G.V., Hodakova D.I. Razrabotka algoritma stabilizacii sistemy «podveshennyj gruz». Sbornik nauchnyh trudov NGTU. – 2009. № 3(57). S. 33–40
- [49] Sablina G.V. Ob odnom podhode k sintezu model'noj sistemy «podveshennyj gruz». Trudy 12 mezhdunar. konf Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostroenija (APJeP–2014), Novosibirsk, 2–4 okt. 2014 g. – 2014. Novosibirsk: Izd-vo NGTU. T.7. S. 68-71.
- [50] Nikulin G.L., Francuzova G.A. Sistema upravlenija dlja jelektromehaniicheskogo usilitelja rulevogo upravlenija avtomobilja. Mehatronika, avtomatizacija, upravlenie. - 2006. № 8. S. 23-28.
- [51] Nikulin G.L., Francuzova G.A. Sintez sistemy regulirovanija jelektromehaniicheskogo usilitelja rulja avtomobilja. Avtometrija. - 2008. № 5. S. 93-99.
- [52] Shendrik D.A., Francuzova G.A. Podhod k kompleksnomu modelirovaniju upravljajemoj sistemy stabilizacii opticheskoy linii vizirovanija.

- Mehatronika, avtomatizacija, upravljenje. - 2008. - № 9. - S.24-28.
- [53] Vostrikov A.S., Mal'cev A.S. Parametricheskaja stabilizacija davlenija. Nauchnyj vestnik NGTU. – 2009. № 4 (37). S.3-10.
- [54] Vostrikov A.S., Maltsev A.S. Parametric pressure control in direct injection gasoline engine. Proc. of the international forum on strategic technologies (IFOST 2009). Vietnam, Ho Chi Minh City, 21-23 Oct 2009. 2009. Sess.1. P. 162-165.
- [55] Vostrikov A.S., Ponomarev A.A. Metod nastrojki reguljatora gazovozdushnogo trakta na osnovu principa lokalizacii. Avtometrija - 2012. T. 48. № 5. C.58 - 65
- [56] Suvorov D.A., Francuzova G.A., Vostrikov A.S. Sintez sistemy upravljenja vyhodnym nagrevatelem prjamotochnogo kotla ugol'noj jelektrostantsii. Doklady Akademii nauk vysshej shkoly Rossijskoj Federacii. - 2015. № 1 (26). S. 94-10.
- [57] Suvorov D.A., Frantsuzova G.A., Zemtsov N.S. Using the Localization Method for Once-through Boiler Control. Proceedings of 9th International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON-2015), Russia, Omsk, May 21–23, 2015. – Omsk: Omsk State Technical University. IEEE Catalog Number: CFP15794-CDR. ISBN: 978-1-4799-7102-2., jelektronnyj resurs.
- [58] Zemcov N. S., Francuzova G.A. Sintez PID reguljatora dlja sistemy upravljenja prjamotochnym kotlom. Mehatronika, avtomatizacija, upravljenje. – 2015. T.16. № 9. S. 631 — 636.
- [59] Vostrikov A. S. Problema sinteza reguljatorov dlja sistem avtomatiki: sostojanie i perspektivy. Avtometrija - 2010. Tom 46. № 2. S.3-19.
- [60] Vostrikov A.S., Francuzova G.A. Sintez PID-reguljatorov dlja nelinejnyh nestacionarnyh ob#ektov. Avtometrija. – 2015, № 5. S. 53-60.
- [61] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2541684. Zajavka № 2013146115, prioritet ot 15.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 15 janvarja 2015 g. Srok dejstvija patenta istekaet 25.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 5.
- [62] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2566339. Prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 20 oktjabrja 2015 g. Bjull. № 29. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36.
- [63] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2584925. Prioritet ot 05.03.15. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 27.04.16. Bjulleten' № 14. Srok dejstvija patenta istekaet 05.03.35. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, G01P 3/36.
- [64] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Reguljator dlja sistem s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.27.09.08. Bjul. № 27. Zajavka № 2008108410/22 ot 04.03.2008, pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [65] V.A. Zhmud', O.D. Jadrjshnikov. Optimizacija reguljatora dlja mnogokanal'nyh ob#ektov s razvitiem idei upreditelja Smita. Avtomatika i programnaja inzhenerija. 2014. № 1 (7). S. 57–67.
- [66] V.A. Zhmud'. Sistema s obratnoj svjaz'ju. Patent na izobrenie № 2540461. Zajavka № 2013145173, prioritet ot 08.10.2013. Zaregistrovano v gosudarstvennom reestre izobrenij RF 19 dekabrja 2014 g. Srok dejstvija patenta istekaet 08.10.2033. Pravoobladatel' FGBOU VPO NGTU. MPK G01R 23/02, 3/36. Bjull. № 4.
- [67] Pat. 2554291, MPK G01R 23/02, G01P 3/36. Struktura modeli dlja optimizacii sistemy s obratnoj svjaz'ju / V. A. Zhmud', A. N. Zavorin; NGTU - 2014112628; zajav. 01.04.14; opub. 27.06.15. - 9 c.



Галина Александровна Французова – профессор кафедры Автоматики в НГТУ, доктор технических наук, автор 160 научных статей и 6 книг по автоматическому управлению. Область научных интересов – теория нелинейных систем автоматического управления, оптимальные и экстремальные системы.
E-mail: frants@intez.nstu.ru

Научная школа академика С.Н. Багаева. К юбилею основателя

Вадим Жмудь

ФГБОУ ВО «НГТУ», Новосибирск, ИЛФ СО РАН, Новосибирск

Аннотация: В статье дан взгляд автора на основные итоги развития методов лазерной научной школы академика РАН Сергея Николаевича Багаева, приводятся результаты работ под его руководством.

Ключевые слова: принцип Локализации, метод разделения движений, малый параметр

ВВЕДЕНИЕ

В этом году 9 сентября отметил свой 75-летний юбилей руководитель научной школы по лазерной физике РАН, научный руководитель Института лазерной физики СО РАН академик Сергей Николаевич Багаев [1, 2]. Многие члены редакционной коллегии, (профессор В.А. Жмудь, профессор Б.В. Поллер, профессор Б.Д. Борисов) причисляют себя к ученикам академика С.Н. Багаева и благодарны ему за научное руководство и иную помощь, продолжают научные исследования с его помощью и под его научным руководством. В этот же год исполнилось 25 лет Институту лазерной физики СО РАН. Почти вся история Института прошла под руководством С.Н. Багаева, а в нынешнем году на посту директора его сменил профессор А.В. Тайченачев, но сам С.Н. Багаев единогласно избран научным руководителем Института. Это дает все основания надеяться и в дальнейшем на его эффективную и деятельную руководящую помощь Институту в его фундаментальных и прикладных исследованиях.

Сергей Николаевич инициировал, организовал и лично выполнял многие значимые научные исследования в областях лазерной физики, квантовой электроники, нелинейно и квантовой оптики, фундаментальной метрологии, лазерной медицины, лазерной техники связи, сверхточным измерителям перемещений, лазерной резке, фемтосекундным лазерам, оптическим часам, сверхмощным фемтосекундным лазерам, твердотельным и полупроводниковым лазерам, лазерной спектроскопии, геофизическим лазерным измерениям и многим другим. Под его руководством постоянно действует диссертационный совет Д 003.024.01 по специальностям «Лазерная физика» и «Оптика». Под его научным руководством защищены многие кандидатские диссертации, также он был научным консультантом по десятку диссертациям на соискание звания ученого

докторов технических и физико-математических наук, среди его учеников профессора А.К. Дмитриев, Е.А. Титов, М.Н. Скворцов, А.М. Ражев, В.А. Орлов и многие другие. Список научных исследований Института неуклонно расширяется. Среди этих направлений – нанотехнологии, системы космической связи и космических измерений, и многие другие.



Редакционная коллегия сердечно поздравляет Сергея Николаевича с юбилеем, желает ему здоровья, творческой активности, дальнейших успехов в развитии науки, техники и технологий.

1. ЛАЗЕРНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ КАК УНИКАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТРУМЕНТ

Лазерное излучение – чрезвычайно тонкий инструмент научного исследования. Аналогов ему в природе нет. Даже без стабилизирующих отрицательных обратных связей самые простейшие лазеры генерируют свет, который по своей стабильности частоты более чем в тысячу раз превосходит большинство радиочастотных генераторов. Действительно,

самый лучший кварцевый генератор дает стабильность частоты не более восьми десятичных порядков. Это – при использовании температурных стабилизаторов и других ухищрений. А без них можно говорить лишь о шести порядках точности. Самый плохой из полупроводниковых лазеров легко дает стабильность частоты более девяти порядков. Стабильность частоты газовых лазеров намного выше. А при стабилизации с помощью специальных электронных систем, измеряющих оптические эталоны, точность воспроизведения частоты может достигать пятнадцати десятичных знаков, но и на этом ученые не останавливаются. Наиболее амбициозные проекты направлены на достижение точностей, измеряемых восемнадцатью и более десятичными порядками. Техника такой стабилизации чрезвычайно сложна. Используется спектроскопия отдельных атомов и даже искусственно созданных квазиатомных структур, таких как мюоний. Но других эталонов частоты, более точных, чем лазерные, в настоящее время нет, и в ближайшее время их появления не предвидится.

Поэтому столь перспективно использование лазерного излучения в качестве эталона частоты. Эти же свойства позволяют использовать лазерное излучение для измерения расстояний и их приращений, причем эти измерения осуществляются с беспрецедентными точностями. Близкородственная тематика – измерение вибраций и сверхмалых деформаций, включая деформации земной коры. Лазерные методы измерений деформаций скальных пород, например, позволяют отслеживать нарушение стабильности дрейфа тектонических плит. Если лунно-солнечные приливно-отливные колебания скальных пород приобретают в спектре своих колебаний характерные более высокочастотные всплески, это говорит о возможности землетрясения в ближайшем будущем. Выявление и детектирование таких предвестников сейсмособытий позволяет заблаговременно предсказать землетрясения или извержения вулканов, что дает надежду избежать больших жертв. Создание сети таких измерителей еще не закончено, но отдельные датчики, разработанные под руководством академика С.Н. Багаева и его учеников, работают уже более двух десятков лет, позволяют собирать статистику и осуществлять мониторинг сейсмособытий.

Лазерные системы позволяют изменять свойства веществ, а также детектировать наличие веществ в столь малых дозах, что слово «микроскопические» в данном случае не подходит. Следовало бы использовать термин «наноскопические дозы вещества», поскольку речь идет даже о возможности обнаружения единичных атомов. Это незаменимый инструмент в биомедицинских исследованиях,

по сути, оптические методы могут позволить читать гены.

2. ЛАЗЕРЫ КАК СРЕДСТВО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОБЪЕКТЫ

Удивительные свойства оптического излучения, проявляющиеся при его взаимодействии с веществом, могут использоваться в нанотехнологиях, микротехнологиях, биомедицинских технологиях. Оптическое излучение может воздействовать на вещество очень локально, очень коротко по времени, очень избирательно. Например, можно подобрать такое излучение, которое будет разрушать нездоровую часть зуба, но не будет повреждать здоровую его часть, поскольку для нездоровой части это излучение будет непрозрачным, а для здоровой – прозрачным. Если вещество для света прозрачно, то свет не нагревает и не разрушает это вещество, если же оно непрозрачно, оно может нагреваться и разрушаться при определенной плотности мощности излучения. Таким образом, можно лечить зубы, не затрагивая здоровую часть зуба, а удаляя лишь его пораженную часть. Также можно лечить различные болезни кожи, мягких тканей и даже глаза. Лазером лечат герпес, глаукому и некоторые другие болезни, требующие длительной терапии или хирургического вмешательства.

Лазерная коррекция зрения не требует рекламы, она широко распространена, истоки этих работ также базируются на исследованиях научной школы академика С.Н. Багаева.

Лазер как скальпель, как инструмент хирурга, в настоящее время уже широко известен, но его возможности далеко не исчерпаны, в будущем можно ожидать новых прорывных технологических решений, основанных на использовании лазерного скальпеля.

Лазерная обработка поверхностей сообщает им новые невиданные свойства. Вся электроника двадцатого века основана на оптических технологиях, тесно связанных с производством микросхем высшей степени интеграции. Достижение большей степени интеграции требует уменьшения длины волны (увеличения частоты) излучения, что требует освоения высокочастотных диапазонов: дальнего ультрафиолетового излучения, рентгеновского излучения и т.д.

3. ЛАЗЕРНЫЕ СРЕДСТВА СВЯЗИ

Оптическая связь, прежде всего – лазерная, это технологии будущего. Тончайшее оптическое волокно может заменить много проводов, а оптический кабель, содержащий сотни и тысячи оптических волокон, позволяет обеспечить такую пропускную способность, которую невозможно обеспечить никакими электрическими кабелями. Оптическое волокно не подвергается воздействию электрических

помех, поэтому даже во время самых мощных грозных разрядов такая связь действует бесперебойно. Она не создает наводок, это самый безопасный вид связи во взрывоопасных помещениях. Также оптические каналы связи можно организовывать и без применения волокон, а с использованием обычной атмосферы. Даже «вредные» свойства атмосферы, такие как рассеивание света, при желании можно обратить на пользу. Эти направления также развивались и развиваются научной школой академика С.Н. Багаева.



4. ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Все лазерные установки являются сложными системами, в которых имеется множество электронных подсистем стабилизации и управления.

Это – системы стабилизации частоты лазеров по эталонам, системы частотной и фазовой привязки частоты одного лазера к другому, системы точного управления разностной частотой для спектрометрических исследований, системы стабилизации мощности излучения, стабилизации тока, стабилизации температуры и многие другие. Кроме того, к электронным системам относятся системы сбора данных, системы обработки собранных сигналов, системы частотных преобразований для преобразования оптической частоты в радиочастотную. Также к ним относятся различные формирователи сигналов сложной или идеальной гармонической формы, синтезаторы частот, компараторы, анализаторы спектра и так далее.

Первые системы были, в основном, аналоговые, но с развитием цифровой техники все больше и больше функций в электронных системах стали выполняться средствами цифровой техники.

Первые цифроаналоговые системы использо-

вали технические решения, которые можно назвать пограничными между аналоговой и цифровой техникой. Например, к таким устройствам можно отнести цифроаналоговый интегратор сигналов на основе реверсивного счетчика, синхронный детектор на основе ЦАП, программируемый усилитель на основе АЦП или на основе ЦАП, умножитель сигналов на основе ЦАП и так далее.

Впоследствии взаимодействие цифровой техники и разрядность АЦП и ЦАП стали столь большими, что в настоящее время почти все задачи электроники, которые еще 15–20 лет назад могли быть решены исключительно средствами аналоговой техники, сейчас должны решаться только методами цифровой техники, поскольку это и надежнее, и дешевле, и проще.

Все основные технические решения по этим системам ранее были испытаны и отработаны на аналоговой технике, но именно в научной школе академика С.Н. Багаева началась разработка электронных систем управления лазерным излучением нового поколения, основанная на цифровой технике.

Характерным примером является измеритель присутствия примесей в воздухе (газоанализатор), разработанный в лаборатории к.т.н. А.И. Карапузиков совместно с лабораторией «Электронных лазерных систем». Аналоговые схемотехнические решения присутствовали только в эскизных проектах. Первые практические работы делались сразу на основе цифровой электронной техники.

5. НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ЭЛЕКТРОННЫМ СИСТЕМАМ УПРАВЛЕНИЯ ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Исследования под руководством академика С.Н. Багаева были чрезвычайно плодотворны. Результаты этих исследований отражены во многих научных публикациях. Только лишь с позиции взгляда автора данной статьи эти исследования столь многочисленны и плодотворны, что в личном перечне работ им найдено более сотни публикаций по указанным тематикам.

Поскольку данная работа не может претендовать на объективное освещение всех исследований академика С.Н. Багаева, мы можем дать только свое видение на этот пласт отечественной науки и проследить его по нашим публикациям, которые составляют ничтожную долю публикаций научной школы Сергея Николаевича.

Учебное пособие о прецизионном управлении лазерным излучением [3] и учебное пособие о моделировании и оптимизации систем управления лазерным излучением [4] написаны специально для кафедры Квантовой электроники НГУ, заведующим которой в этот период был Сергей Николаевич. В этих пособиях использован опыт, полученный при

разработке, исследовании и модификации лазерных систем лично и с помощью сотрудников лаборатории «Электронных лазерных систем» Института лазерной физики СО РАН. Более поздний опыт был отражен в учебном пособии [5].

Учебное пособие в четырех частях [6–9] написано для кафедры Лазерных систем НГТУ, которая воссоздана усилиями Сергея Николаевича.

Широко известна система стабилизации частоты He-Ne-лазера по линиям поглощения метана. Она содержит множество подсистем автоматического управления и стабилизации. На Рис.1 показана система стабилизации мощности лазерного излучения. В этой схеме ответвляется часть мощности лазерного излучения, измеряется ее величина, сравнивается с предписанным значением, определяется ошибка, и через регулятор величина ошибки подается на управление мощностью генератора, питающего акустооптический модулятор. В результате, от излучения лазера отщепляется некоторая его часть таким образом, чтобы оставшаяся величина излучения была стабильна по мощности. Чтобы исключить влияние засветок и тепловых воздействия на фотодетектор, в оптическом пути имеется прерыватель, а вся система работает только по переменному сигналу от фотоприемника.

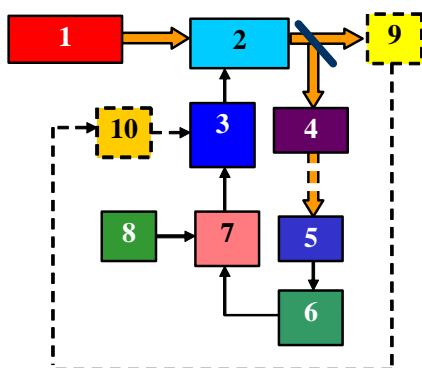


Рис. 1. Подсистема стабилизации мощности лазерного излучения: 1 – лазер; 2 – акустооптический модулятор; 3 – генератор; 4 – прерыватель света; 5 – фотодетектор; 6 – амплитудный детектор; 7 – регулятор мощности генератора; 8 – формирователь предписанной величины мощности лазерного излучения; 9 – частотный детектор (не обязательный); 10 – регулятор частоты генератора (не обязательный)

Подобные схемы ранее использовались очень широко, это эффективные подсистемы, в некоторых случаях незаменимые. Недостатком такой подсистемы является механический прерыватель, представляющий собой диск с прорезями, насаженный на вращающийся вал двигателя. В лазерных системах механические движения не желательны, так как они создают дополнительные вибрации, шумы, потоки воздуха. В последнее время стали использоваться такие лазерные системы, где стабиль-

ность мощности излучения уже не так важна, либо осуществляется иным путем, но принцип действия их приблизительно такой же. Кроме того, появились элементы, в которых прерывание луча или его отклонение может быть обеспечено без использования чисто механического прерывателя.

На Рис. 2 показана подсистема стабилизации частоты лазерного излучения. В этой подсистеме используется оптическая эталонная ячейка, поглощение которой имеет зависимость от частоты с резко выраженным стабильным пиком. Также могут использоваться ячейки с фотолюминисценцией. Как не трудно заметить, в этой подсистеме имеется множество узлов электронной техники, которые разрабатывались с лаборатории Электронных лазерных систем.

На Рис. 3 показана подсистема фазовой привязки частоты излучения одного лазера к частоте излучения второго лазера. Лазер с номером 1 в этом случае ведущий, а лазер с номером 2 – ведомый.

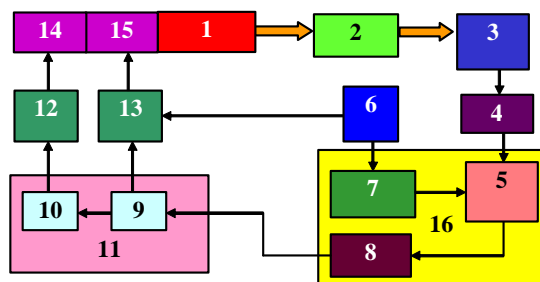


Рис. 2. Подсистема стабилизации мощности лазерного излучения: 1 – лазер; 2 – эталонная поглощающая ячейка; 3 – фотодетектор; 5 – умножитель сигналов; 6 – генератор; 7 – фазосдвигающий фильтр; 8 – фильтр низких частот; 9 и 10 – интегратор; 11 – регулятор; 12 и 13 – высоковольтные усилители; 14 и 15 – пьезоэлектрические модуляторы; 16 – синхронный детектор

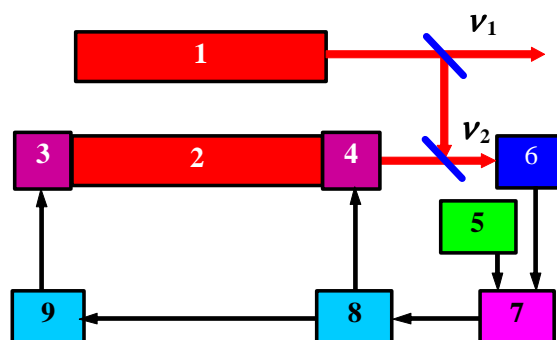


Рис. 3. Подсистема фазовой автоподстройки (привязки) частоты излучения лазера 2 к частоте излучения лазера 1: 1 – ведущий лазер; 2 – ведомый лазер; 3 и 4 – пьезоэлектрические модуляторы; 5 – генератор; 6 – фотодетектор; 7 – фазовый детектор; 8 и 9 – регуляторы (интеграторы); v_1 и v_2 – частоты лазеров 1 и 2

В этой системе также очень много электронных блоков. Электронная часть системы по Рис. 3 настолько сложна, что ее

целесообразно показать на отдельной схеме. Эта система показана на *Рис. 4*. Эта электронная схема также разработана в лаборатории Электронных лазерных систем в составе Института лазерной физики.

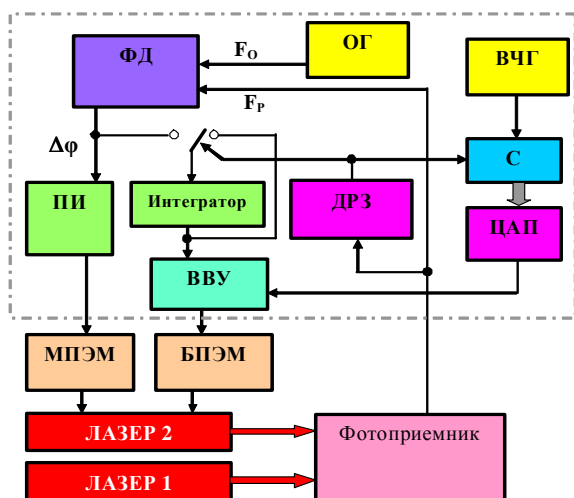


Рис. 4. Электронная часть системы фазовой автоподстройки частоты: ФД – Фазовый детектор; ОГ – опорный генератор; ВЧГ – высокочастотный генератор; С – счетчик; ДРЗ – детектор режима захвата; ПИ – пропорционально-интегральный регулятор; ВВУ – высоковольтный усилитель; БПЭМ – быстрый пьезоэлектрический модулятор; МПЭМ – медленный пьезоэлектрический модулятор

Отдельно хочется отметить статьи в соавторстве с Сергеем Николаевичем [10–16]. Безусловно, основной вклад в этих публикациях принадлежит научному руководителю. В этих публикациях описаны значимые достижения в области лазерной физики или фундаментальной метрологии, результаты получены большим коллективом, и включение исполнителей в список соавторов является признанием существенного творческого вклада в общий результат. В ряде зарубежных изданий высокого рейтинга количество соавторов ограничено, поэтому не всегда все участники исследований являются авторами статьи, описывающей это достижение. Тем ценнее те статьи, где такое соавторство имеет место.

6. СТАБИЛИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

Одно из важнейших направлений исследований под руководством академика С.Н. Багаева связано с производством и использованием полупроводниковых лазеров [17–29]. До начала этих исследований полупроводниковые лазеры производились и широко использовались в отечественной промышленности преимущественно как точечные источники оптического излучения, их стабильность частоты в большинстве их применений не использовалась, кроме идиличных довольно сложных систем,

разрабатываемых в научных институтах РАН как отдельные экспериментальные установки и стенды. Полупроводниковые лазеры уже использовались в доплеровских измерителях скорости, интерферометрических измерений приращений расстояний, но не использовались в стандартах частоты. Для разработки стандартов частоты на основе полупроводниковых лазеров потребовались кропотливые исследования этих приборов, разработка схем стабилизации тока и температуры [17–27], исследование шумов в цепи тока лазера [28] и даже разработка системы активного подавления шумов [29].

На *Рис. 5* показана обобщенная структурная схема системы стабилизации температуры и тока накачки полупроводникового лазера.

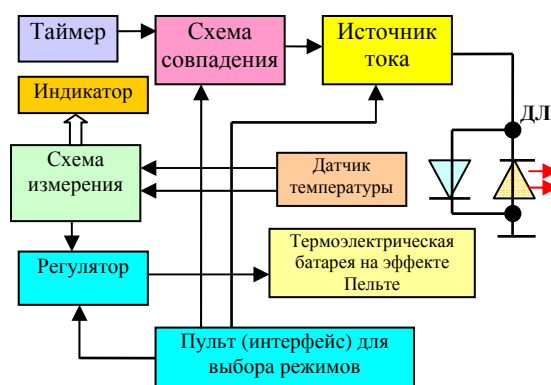


Рис. 5. Схема стабилизации температуры и тока накачки полупроводникового лазера: ДЛ – диодный (полупроводниковый) лазер

7. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТ И РАЗНОСТЕЙ ФАЗ

Применение лазерных систем для стандартов частот, в прецизионной лазерной спектроскопии, для измерений приращений расстояний и вибраций и в других областях их использования требуют высокоточного измерения частот и разностей фаз, получаемых путем смешивания излучения различных лазеров на общем фотоприемнике. Отсутствие серийных изделий, доступных для приобретения и использования в этих целях, потребовало разработки собственных устройств для этих целей. Как руководитель этих работ, Сергей Николаевич всесторонне поддерживал эти исследования, обеспечивая их финансированием, кадровыми ресурсами и организационными мероприятиями. Это способствовало разработке и созданию целой серии уникальных прецизионных частотомеров и фазометров, не имеющих аналогов в отечественном приборостроении, и даже, на момент их создания, не имеющих серийных аналогов в мире [30–49].

На *Рис. 6* показан разработанный для этих целей измеритель разности фаз двух высокочастотных сигналов.

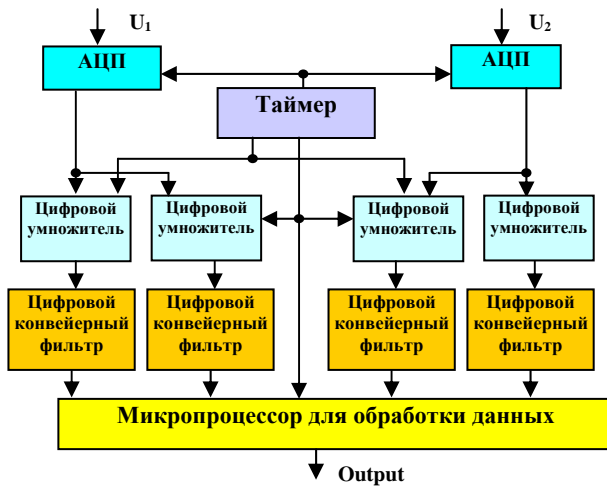


Рис. 6. Фазовый детектор на основе аналого-цифрового преобразователя (АЦП)

Все, что находится после АЦП в этом измерителе выполнено полностью на цифровой технике. Эта часть измерителя может быть сделана по одной из нескольких альтернативных схем, отличающихся большей или меньшей простотой, как показано на Рис. 7 и 8. Эти устройства представляют собой следующие друг за другом модификации, в которых упрощение связано с повышением надежности и сохранением или улучшением точности.

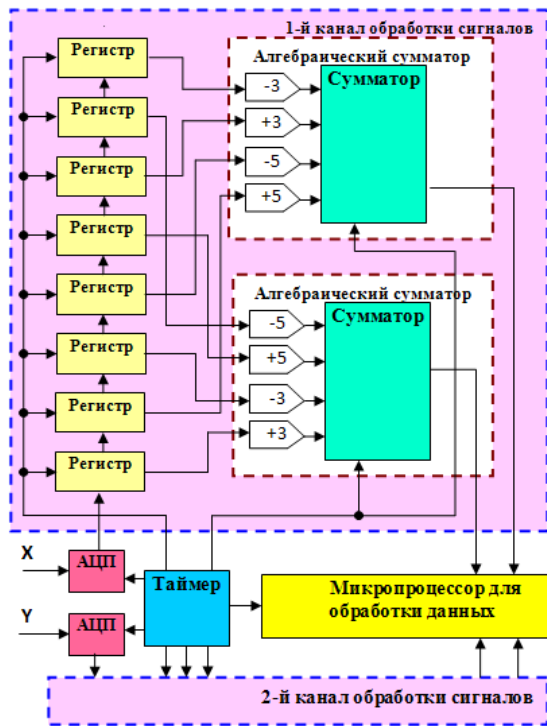


Рис. 7. Цифровая часть фазового детектора

На Рис. 9 показана схема установки для измерения разности частот излучения двух лазеров. Эта схема не позволяет изменить разность частот в области высоких частот. На Рис. 10 показана более совершенная схема, которая позволяет измерять разность частот в широкой полосе.

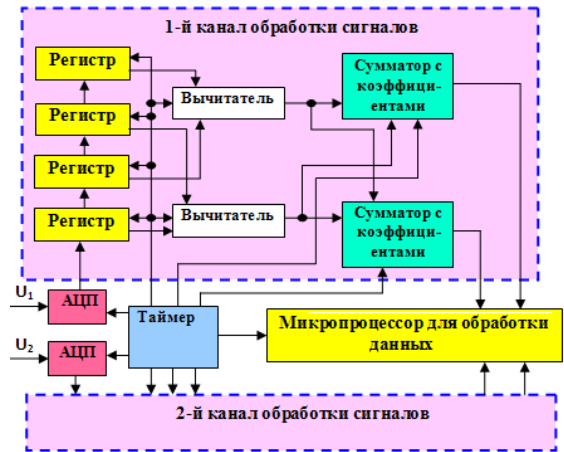


Рис. 8. Цифровая часть фазового детектора (альтернативная схема)

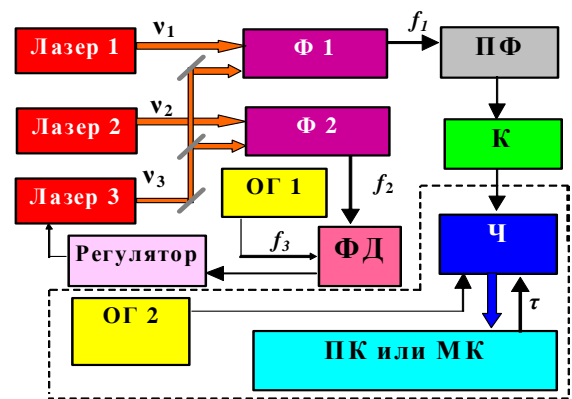


Рис. 9. Установка для измерения стабильности частоты лазерного излучения: Ф – фотодетектор, ОГ – опорный генератор, ФД – фазовый детектор, ПФ – полосовой фильтр, К – компаратор, ЧМ – частотомер, ПК или МК – персональный компьютер или микроконтроллер

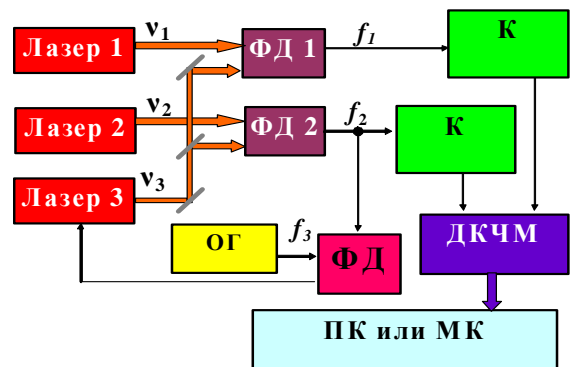


Рис. 10. Установка для измерения разности частот излучения двух лазеров в широкой полосе частот: ДКЧМ – двухканальный частотомер

8. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ МАЛЫХ ВИБРАЦИЙ И ПРИРАЩЕНИЙ ДЛИН

Лазерные метрологические системы как тончайший инструмент для измерения приращений длины, а также для измерения вибраций, получили под руководством Сергея Николаевича особое развитие. Этот точнейший

инструмент позволил измерять вибрации, величина которых определяется сотыми долями от длины волны лазерного излучения, что составляет доли нанометров. Такая чувствительность по отношению к вибрациям была подтверждена экспериментально [50–54].

Возможность измерений сверхмалых приращений расстояний позволило создать новое направление в геофизических исследованиях. Оно состоит в измерении лазерными методами лунно-солнечных приливно-отливных деформаций земной коры. Это делается с целью выявления и использования предвестников землетрясений [55–57].

Принцип действия такой лазерной системы основан на схеме интерферометра Майкельсона, как показано в упрощенном виде на *Рис. 11*. В реальной системе схема намного сложнее и использует два лазера, в данной статье она не приводится, поскольку широко публиковалась в других статьях [50–57].

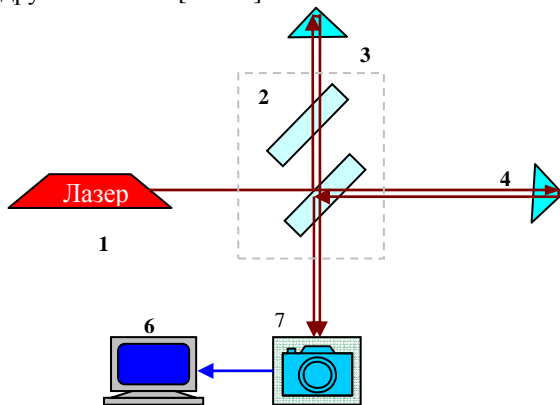


Рис. 11. Цифровая часть фазового детектора

9. ЛАЗЕРНЫЕ ПОДСИСТЕМЫ

Лазерные подсистемы являются частью более сложных лазерных систем. Это, прежде всего, системы стабилизации частоты или разности фаз с использованием отрицательной обратной связи [58–73], а также, собственно, интерферометры [74].

Для успешной разработки лазерных подсистем было также предпринято развитие методов синтеза систем с отрицательной обратной связью, то есть разработка новых методов расчета регуляторов. Даже после прекращения непосредственной разработки лазерных подсистем, методы синтеза регуляторов продолжали совершенствоваться в сотрудничестве с коллегами из Института лазерной физики СО РАН [75–81], поэтому и на данные исследования научная школа Сергея Николаевича оказала самое плодотворное влияние.

10. НОВЫЕ ИДЕИ В ЛАЗЕРНОЙ ФИЗИКЕ

Наверное, самым любимым направлением исследования академика С.Н. Багаева является

прецизионная лазерная спектроскопия, а также стандарты частоты на основе спектрометрических систем, и оптические (лазерные) часы. Публикации на эту тему вызывают нашу особую гордость [82–92], их немного, но это веки исследований под его руководством.

На *Рис. 12–17* показаны различные оптические схемы, которые могут быть использованы для стабилизации частоты лазерного излучения с целью прецизионной лазерной спектроскопии [60].

Рассмотрим в самом упрощенном виде схему для фазовой привязки частот двух лазеров, как показано на *Рис. 12*. Теоретически такая структура могла бы быть использована для когерентного сложения света от двух лазеров. Но в ней невозможно обеспечить широкую полосу автоподстройки частоты. Это вызвано тем, что при нулевой разности фаз частот двух лазеров фотоприемник не может обеспечить достаточно точное измерение сигнала, несущего информацию о разности фаз, и сам этот сигнал не дает информации о знаке разности фаз. Для сравнения рассмотрим систему привязки частоты второго лазера к частоте первого лазера с наперед заданной разностью частот, как показано на *Рис. 13*.

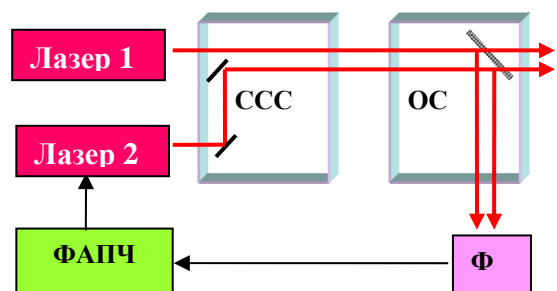


Рис. 12. Схема для фазовой автоподстройки частоты лазера 2 к частоте лазера 1: ССС – схема сложения света; ОС – ответвитель света; Ф – фотодетектор; ФАПЧ – система фазовой автоподстройки

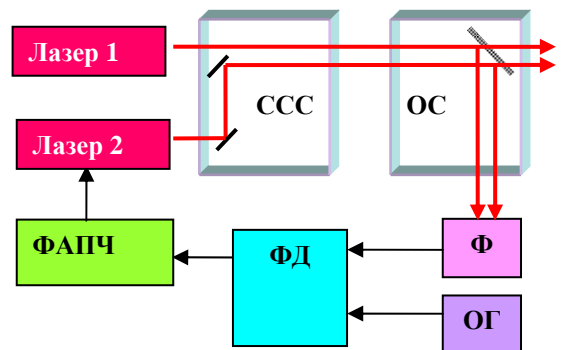


Рис. 13. Схема для фазовой автоподстройки частоты лазера 2 к частоте лазера 1 с заданной разностью частот: ОГ – опорный генератор, ФД – фазовый детектор, остальные обозначения те же, что на *Рис. 12*

В этой схеме фотоприемник работает с высокочастотным сигналом, поскольку между частотами излучения имеется разность частот, равная частоте опорного генератора.

Разность частот этих двух лазеров, как правило, составляет 1 МГц или больше. Этот сигнал может легко детектироваться фотодетектором и выделяться из шумов. Условия работы фазового детектора также позволяют обеспечить его широкую полосу частот, что позволяет достигать высокой точности и быстродействия всей системы.

Однако, если целью работы является именно когерентная привязка частот двух лазеров, то схема по Рис. 13 не подходит принципиально, а схема по Рис. 12, как видим, неработоспособна. Поэтому в работе [60] была предложена схема, показанная на Рис. 14.

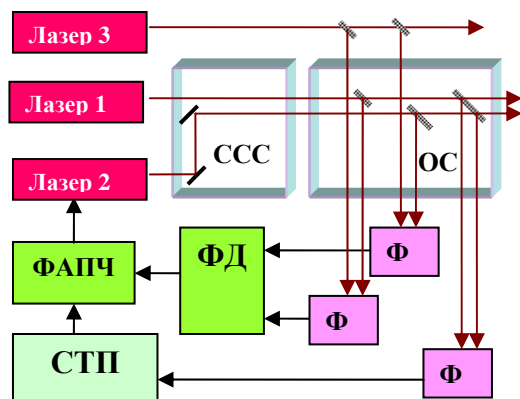


Рис. 14. Предложенная структура для когерентного сложения пучков лазера 1 и лазера 1: Лазер 3 – вспомогательный лазер, СТП – система точной подстройки

Система содержит опорный высокостабильный по частоте лазер 3 (оптический частотный стандарт). Его свет используется как гетеродинная частотная опора. Каждый из двух фотодетекторов преобразует сумму двух попадающих на него засветок в электрический сигнал. При этом каждый фотоприемник работает в гетеродинном режиме, то есть следствие суммирования света от лазера на фотоприемнике вырабатывается разностная частота. Разность фаз сигналов разностных частот измеряется фазовым детектором. Он вырабатывает электрический сигнал, пропорциональный разности этих фаз. Этот сигнал используется для управления фазой Лазера 2. В результате разность фаз между излучением второго и первого лазеров сводится к минимуму. Поэтому и частоты излучения этих двух лазеров становятся равными. В системе может сохраняться ненулевая разность фаз, которая должна быть устранена дополнительной подстройкой, например, путем изменения оптической длины одного из пучков или длины одного из электрических кабелей от фотоприемника к фазометру. Но лучшим решением является системы точной подстройки. Эта система обеспечивает точную настройку фазы для обеспечения синфазности двух пучков лазерного излучения. С этой целью мощность

излучения, измеряемая дополнительным фотодетектором, настраивается на максимум.

В структуре, показанной на Рис. 15, введена дополнительная система фазовой автоподстройки частоты, которая настраивает частоту первого лазера к частоте третьего лазера с той же разностной частотой, что и между частотами второго и третьего лазеров.

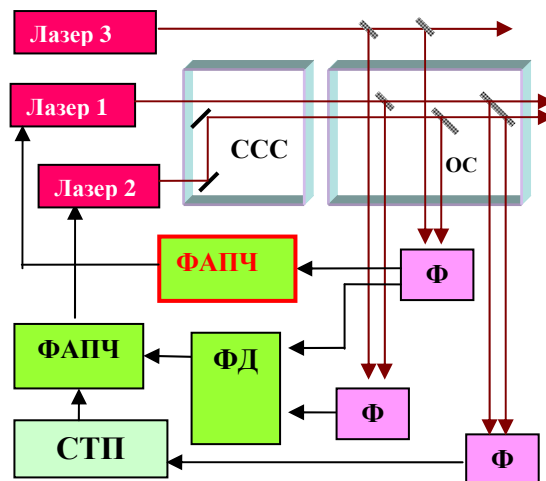


Рис. 15. Структура, развивающая идею структуры по Рис. 14: введена дополнительная фазовая автоподстройка для Лазера 1, обозначения на схеме те же, что и на Рис. 14

Структура по Рис. 15 содержит множество сложных контуров, что делает ее разработку и настройку крайне сложной задачей. На Рис. 16 показана структура, которая может с успехом использоваться для отладки системы точной подстройки.

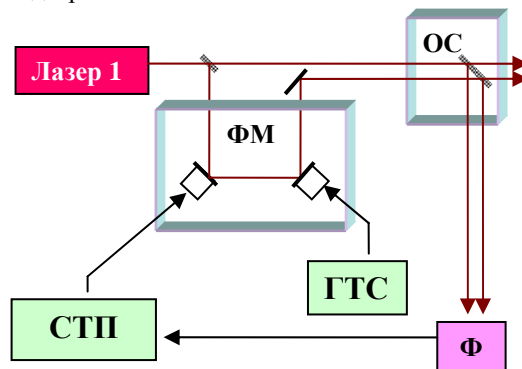


Рис. 16. Схема для разработки, отладки и тестирования системы точной подстройки: ФМ – фазовый модулятор; ГТС – генератор тестовых сигналов

Как видно из Рис. 16, в этой структуре присутствует единственный лазер. Принцип действия такой системы основан на том, что два разны пучка лазерного излучения от одного лазера в точке их разделения когерентны, их частоты совпадают, и если оптические пути каждого из лучей стационарны, то эта когерентность остается на выходе оптической схемы. Если же в один из пучков внести

фазовую модуляцию, то когерентность нарушится. Таким образом, ее можно нарушить на известную величину, которая по желанию может быть больше или меньше. Генератор тестовых сигналов может вводить такое рассогласование на известную величину по уровню и на известной и заранее выбранной частоте. Система точной автоподстройки должна устранить влияние этого рассогласования, и с этой целью другой модулятор фазы должен формировать равное по величине и обратное по знаку воздействие на фазу этого же пучка света.

Во всех рассмотренных схемах обратная связь может обеспечить высокую точность автоматической подстройки частоты в среднем, то есть в отношении разности частот (и фаз), осредненных за очень длительный интервал времени. Этого нельзя утверждать в отношении кратковременной стабильности частоты.

Нежелательный эффект в системах с активной стабилизацией частоты излучения состоит в том, что в этих системах используется частотная модуляция. Такая модуляция разрушает кратковременную стабильность используемого лазера. Действительно, как правило, в таких системах частота лазера изменяется по гармоническому закону вследствие изменения длины резонатора. Это достигается подачей гармонического сигнала на пьезоэлектрический модулятор, на котором крепится одно из зеркал лазера. Такое воздействие не только создает неустраняемые девиации частоты этого лазера, но также еще и создает акустическое возмущение во всей конструкции лазера (как правило, воздействие идет на звуковой частоте больше 500 Гц, но меньше 20 кГц). Предлагаемая структура, показанная на Рис. 17, позволяет по возможности устранить девиации частоты в основном пучке света стабилизируемого лазера. Это может способствовать дальнейшему повышению точности работы такой системы.

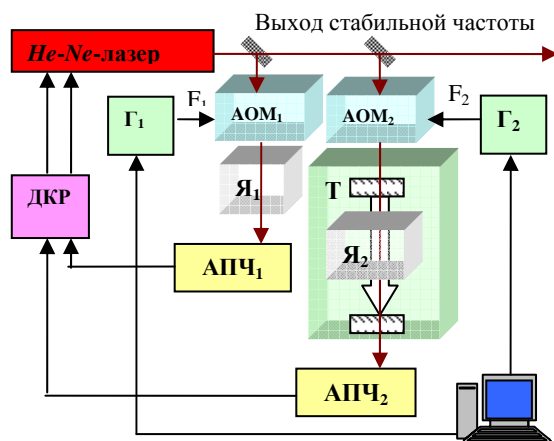


Рис. 17. Система для стабилизации частоты: АОМ – акустооптический модулятор, Г – генератор, АПЧ – система автоподстройки частоты, Я – оптическая опорная ячейка, ДКР – двухканальный регулятор, Т

– телескопический расширитель пучка

Эта система содержит два отдельных контура стабилизации частоты. Быстрая петля обеспечивает улучшение кратковременной стабильности частоты. Это необходимо для успешного функционирования медленной петли. Медленная петля более точна, чем быстрая. Без детектирования сверхтонкой структуры линий поглощения (например, метана) медленную петлю было бы невозможно реализовать. Быстрая петля недостаточно точна, поскольку она реализована без детектирования сверхтонкой структуры поглощения, для ее работы используется сигнал, который может быть получен очень просто и в широкой полосе частот. Этот сигнал от линии поглощения без разрешения сверхтонкой структуры. Медленная петля использует иной способ измерения, с учетом сверхтонкой структуры. Эта петля может использовать сигнал, накопленный за много проходов записи этих линий поглощения. Медленная петля более точна, но и более медленна. При этом используется единственный лазер, из которого при помощи светодетельных (полупрозрачных) пластин ответвляется несущественная часть основной мощности излучения.

В отличие от других подобных схем, модуляция вводится не путем воздействия на лазер, а путем воздействия непосредственно на пучок света при прохождении его через акустооптический модулятор (АОМ). Используя в каждом из пучков собственный АОМ, можно ввести в каждый пучок индивидуальный сдвиг частоты. При этом если частота питания модулятора также имеет девиации, то и полученный сдвиг частоты будет иметь частотные девиации, притом, что основное излучение, направляемое на выход всей системы, свободно от искусственно вносимых девиаций частоты.

Пусть от генераторов Γ_1 и Γ_2 на модуляторы $АОМ_1$ и $АОМ_2$ поступают частоты F_1 и F_2 , соответственно. Эти частоты в среднем можно стабилизировать и контролировать с достаточно высокой точностью. Каждая из этих частот имеет свою частотную девиацию:

$$F_1 = F_0 + \Delta F_1 \sin 2\pi f_1 t,$$

$$F_2 = F_0 + \Delta F_2 \sin 2\pi f_2 t + \delta F.$$

Например, можно выбрать следующие значения для этих частот:

$$f_1 \approx 15 \text{ кГц}, f_2 \approx 500 \text{ Гц}, F_0 \approx 80 \text{ МГц},$$

$$\Delta F \approx 20 \text{ Гц}, \Delta F_2 \approx 2 \text{ Гц}.$$

На Рис. 18 показано возможное расположение спектров преобразуемых в этой схеме оптических частот излучения лазера. Здесь ν_1 – исходная частота излучения лазера. В исходном состоянии при отключенных обратных связях эта частота может изменяться в относительно широких пределах, что показано широким спектром излучения на верхней диаграмме в

виде сигнала $\nu_1(t)$, как функции времени. Частота излучения на выходе первого АОМ отличается на величину частоты F_1 . То есть частота этого пучка света равна $\nu_2(t) = \nu_1(t) + F_1(t)$. Эта частота должна быть близка к частоте резонанса поглощения метановой ячейки.

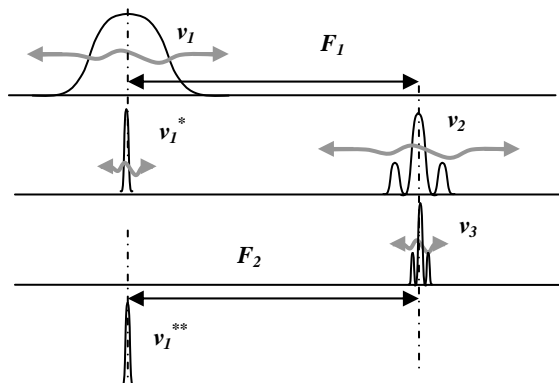


Рис. 18. Диаграммы преобразований частот в структуре по Рис. 17

Вследствие девиации частоты F_1 спектр этого пучка света имеет две боковые полосы, как показано на второй линии диаграммы. Быстрая петля обратной связи воздействует на лазер в среднем и стабилизирует его частоту по линии поглощения метана без разрешения сверхтонкой структуры. Вследствие этого частота лазера оказывается в среднем стабилизированной лучше, чем было бы, если бы обратная связь отсутствовала. Это сужает спектр исходного излучения, но в нем не возникают боковые полосы, что отражено в левой части второй линии диаграммы. Условно обозначим получаемую частоту излучения лазера символом $\nu_1^*(t)$.

С помощью второго АОМ второй луч света приобретает свой индивидуальный сдвиг частоты, в котором отсутствуют боковые полосы, имеющие место в луче на выходе первого АОМ. Но в нем присутствуют собственные боковые полосы, порождаемые модуляцией второй частоты, что показано в третьей линии диаграммы на Рис. 18. Частота на выходе второго АОМ равна $\nu_3(t) = \nu_1(t) + F_2(t)$. Эта частота должна быть близка к экстремуму поглощения второй метановой ячейки. Вследствие девиации второй частоты F_2 структура сверхтонких линий поглощения может быть зарегистрирована, и по результатам регистрации может включаться медленный контур автоподстройки. Путем сканирования среднего значения частоты F_2 с помощью дополнительного частотного сдвига δF можно достаточно точно исследовать сверхтонкую структуру поглощения второй метановой ячейки. Поскольку в подобных схемах, которые можно считать прототипом, используется телескопическое расширение пучка [13], можно

рекомендовать его использование и в данном случае. В результате такого исследования выявляется отклонение средней частоты ν_3 от экстремума сверхтонкой структуры. Для возвращения его в нужную область система автоподстройки должна воздействовать на частоту генератора G_1 . Таким образом, частота ν_3 в результате работы системы автоматической подстройки будет всегда равняться нужному значению, то есть совпадать с экстремумом поглощения в схеме с разрешением сверхтонкой структуры. Поскольку эта частота отличается от частоты излучения лазера только на величину добавки F_2 , и поскольку частота F_2 в среднем не изменяется, она задается нами, и ее значение в каждый момент времени нам точно известно, то в результате работы всей системы частота излучения оказывается стабилизированной по сверхтонкой структуре линий поглощения метана. При этом на лазер не подается никакого воздействия с целью модуляции его частоты излучения в области звуковых частот. На лазер в данной структуре подаются только сигналы медленной и быстрой автоподстройки частоты, каждый из этих сигналов содержит лишь корректирующую поправку частоты, но не содержит сигналов тестовой девиации, которые содержатся во всех аналогичных известных схемах. Поэтому окончательно спектр излучения лазера может быть представлен спектром $\nu_1^*(t)$ слева в нижней линии диаграммы Рис. 18.

Указанное техническое решение является интеллектуальной собственностью Института лазерной физики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как очень скромный человек, академик С.Н. Багаев, по-видимому, не стал бы «тратить время» на «юбилейную» статью. Он предпочитает двигаться вперед. Как талантливый организатор науки и «генератор идей», он, возможно, и сам не задумывался о том, какой мощный энергетический толчок к научным исследованиям он иногда дает тем, с кем он сотрудничает. Даже если это сотрудничество не превышает двух десятилетий, для автора этой статьи оно сопоставимо с целой жизнью.

Пожелаем ему крепкого здоровья и дальнейших успехов в его важных и крайне интересных научных исследованиях.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Сергей Николаевич Багаев. Квантовая электроника. 2001. Т. 31, № 10. С. 940. http://www.quantum-electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=2114
- [2] Википедия: Багаев Сергей Николаевич. https://ru.wikipedia.org/wiki/Багаев,_Сергей_Николаевич
- [3] В.А. Жмудь. Прецизионные системы управления

- лазерным излучением. Учеб. Пособие. Новосиб. гос. ун-т. Новосибирск, 2005. 152 с.
- [4] В.А. Жмудь. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. Пособие. Новосиб. гос. техн. ин-т. Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. 116 с.
- [5] В. А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: специальные главы. Учебное пособие. Новосибирск. Издательство НГУ. 2010. 198 с.
- [6] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. Ч.1. 63 с.
- [7] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999. Ч.2. 55 с.
- [8] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2000. Ч.3. 50 с.
- [9] В.А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: Учеб. пособие. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. Ч.4. 64с.
- [10] S.N. Bagaev, A.M.Belkin, A.S.Dychkov et al. Ultrastable, compact diode-pumped Nd:YAG-laser for precision measurements. QELS'1995, P.172–173.
- [11] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. MPLP'97 - The second International symposium on Modern problem of laser physics. Novosibirsk, Russia, July 28 - August 2, 1997, pp. P111–P112.
- [12] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. Российско-Германский лазерный симпозиум - Новосибирск, 27.06 - .07.97 - Technical digest - p.P12–P13
- [13] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. - MPLP'97 - Proceedings of the Second Int. Symposium on Modern Problem of Laser Physics: v.1, pp.377–386. Новосибирск, 1997.
- [14] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. Quantum Electronics. 2000. T. 30. № 7. С. 641–646.
- [15] С.Н. Багаев, А.С. Дычков, А.С. Ефимов и др. Создание абсолютного стандарта частоты для экспериментов по прецизионной спектроскопии мюония. Информационный бюллетень РФФИ. 1996. Т. 4. № 2. С. 1095.
- [16] S.N. Bagayev, S.V. Chepurov, A.S. Dychkov et al. Femtosecond optical clock for precise measurements. Technical Digest. V International Symposium 'Modern Problem of Laser Physics'- MPLP'2008 – Novosibirsk. P.61.
- [17] V. D. Gitelson, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud. A frequency-selective system for stabilizing the diode-laser radiation power without operating-point shift. Instruments and Experimental Techniques. Volume: 52. Issue: 1. P. 122–128 Published: JAN 2009.
- [18] А.С.Ефимов, В.А.Жмудь, И.В. Падюков. Прецизионный источник тока для полупроводникового лазера. Автометрия, 1997, N 3 с.111–115.
- [19] В.А. Жмудь, И.В. Падюков. Прецизионная микропроцессорная система стабилизации температуры. Автометрия. 1997. N 5, с. 115–120.
- [20] А.А. Воевода, В.А. Жмудь, А.Л. Соловьев. Цифровая система термостабилизации полупроводникового лазера: математическая модель и условия получения оптимального переходного процесса. Автометрия. N 3, 2000. С.109–121.
- [21] А.С. Ефимов, В.А. Жмудь, Д.Ю. Ивашко, И.В. Падюков. Прецизионное управление полупроводниковыми лазерами. ПТЭ, 2000г. N 4, с.105–110.
- [22] В.А. Васильев, В.А. Жмудь. Система термостабилизации диодного лазера. ПТЭ, 2000г. N 4, с.158–159.
- [23] В.А. Жмудь, А.Г. Соколов. Источник импульсного тока для инжекционных полупроводниковых лазеров. ПТЭ, 2000, N2, с.155–156
- [24] В.А. Жмудь. Автоматизированные системы управления полупроводниковыми лазерами для прецизионной спектроскопии. Гос. научно-техническая программа «Фундаментальная метрология» - Сб. отчетов за 1997 г. Новосибирск, 1998, с.173–177.
- [25] Д.О. Терешкин, В.А. Хличкин, В.А. Жмудь. Идентификация термоэлектрической батареи с датчиком температуры для термостатирования диодного лазера. Сборник научных трудов НГТУ. - 2007. - № 3(49). С.137–140.
- [26] Гительсон В.Д., Воевода А.А., Жмудь В.А. Частотно-избирательная стабилизация мощности излучения диодного лазера без смещения рабочей точки. ПТЭ. 2009. N1. с.135-141.
- [27] А.А.Воевода, В.А. Жмудь, Д.Ю. Ивашко и др. Автоматизированный стенд для снятия ватт - амперных характеристик полупроводникового лазера при различных температурах. ч.1. Сб. научн. трудов НГТУ, 1997 N 3 (8), с.91–96. ч.2. Сб. научн. трудов НГТУ, 1997, N 4 (9), с. 41–46.
- [28] В.А. Жмудь, А.Г. Соколов. Исследование помех в цепи диодного лазера. Научный вестник НГТУ, 2004, N 2(17), с.83–92.
- [29] В.Д. Гительсон, А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Активное подавление полосовых шумов полупроводникового лазера без смещения рабочей точки. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2007. 4(50). С.149–154.
- [30] В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Цифровой частотомер. Патент РФ N 2210785 (приоритет от 13.07.01.) Оpubл.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03. G01 R25/00, H03 D13/00
- [31] В.А. Васильев, В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Преобразователь масштаба времени. Патент РФ N 2210783 (приоритет от 20.08.01.) Оpubл.: Гос. реестр изобретений РФ. Бюлл. N23, 20.08.03. G01 R23/00
- [32] А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь. Цифровой частотомер. Патент РФ на изобретение N2278390. G01R 23/02. Оpubл. Бюлл. N17, от 20.06.06.
- [33] А.М. Гончаренко, В.А. Васильев, В.А.Жмудь. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент RU 2225012: H03D13. G01R25, G01R 21/00; G01R 29/02; H03D. Владельцы патента: Институт лазерной физики СО РАН.
- [34] В.А. Жмудь, А.М. Гончаренко. Прецизионный частотомер для фундаментальной метрологии. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 2 (8). С. 73–80.
- [35] А.М.Гончаренко, С.В.Бугров, В.А.Жмудь. Мониторинг фазовых приращений прерывистого сигнала. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Том 2. Выпуск 1, с. 61-64. ISSN 1818-7994.
- [36] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, В.М. Сембаламут, А.М. Гончаренко, С.В. Бугров. Фазометр с гетеродинным преобразованием частоты. Патент на изобретение №2470312. Заявка: 2010139880/28, 28.09.2010. Опубликовано: 20.12.2012. Патентообладатели: НГТУ, ИЛФ
- [37] А.М. Goncharenko, V.A. Zhmud', S.A. Avilov. Fast 3-Channel Precision Frequency Meter – Time Analyzer with Zero Dead Time Interval. Technical Digest of MPLP-2004 IV Int. Sympos. on Modern Problem of Laser Physics, Novosibirsk, Russia, August 22-27, 2004. P.290 – 291.
- [38] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, А.М. Гончаренко. Многоканальный прецизионный быстродействующий частотомер. Научный вестник НГТУ. 2005. N 1(19). С. 73–82.
- [39] В.А. Жмудь. Прецизионные измерения частоты для аттестации частотных стандартов. Автоматика и программная инженерия. 2014. 1(7). С. 104–119.
- [40] А.С. Ефимов, В.А. Жмудь. Синтезатор частоты со сверхмалым шагом для систем частотной и фазовой автоподстройки. Автометрия. 1996. N 2. с. 21–25.
- [41] А.С.Ефимов, В.А. Жмудь. Цифровой синхронный детектор с генератором медленного сигнала. ПТЭ, 2000, N3, с.45–48.
- [42] А.М. Гончаренко, А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Аттестация трехканального прецизионного быстродействующего частотомера // Научный вестник

- НГТУ. 2005. N 2. с. 175–178.
- [43] С.В. Бугров, А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь, А.А. Воевода. Программное обеспечение и функциональные возможности многоканального прецизионного быстродействующего частотомера. Научный вестник НГТУ. - 2006. - N 3(24). с.171–178.
- [44] А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь, А.А. Воевода, С.А. Авиллов. Микропроцессорный прецизионный трехканальный высокоскоростной частотомер без «мертвого времени». Приборы и техника эксперимента. 2007. N2. с. 78–83.
- [45] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.1. Научный вестник НГТУ. 2009. N 4(37). С.25–32.
- [46] Воевода А.А., Гончаренко А.М., Жмудь В.А. Фазометры для радиочастотных и лазерных измерителей перемещений и вибраций. ч.2. Научный вестник НГТУ. 2010. N 1(38). С.35–74.
- [47] Гончаренко А.М., Жмудь В.А., Прецизионный высокочастотный фазометр для измерения нановибраций. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2009. 1(55). С. 108–117.
- [48] Гончаренко А.М., Бугров С.В., Воевода А.А., Жмудь В.А. Метрологические испытания цифрового прецизионного фазометра. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2009. 2(56). С. 109–114.
- [49] B.D. Borisov, A.M. Goncharenko, V.A. Vasiliev, V.A. Zhmud'. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 162–166.
- [50] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260–264.
- [51] С.В. Бугров, В.А. Жмудь, Е.В. Прохоренко, А.М. Гончаренко. Методы и средства нановиброметрии. Материалы X Международной конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП – 2010 в 7 тт. т.3. Новосибирск. Изд-во НГТУ. С.119–123. ISBN: 978-1-4244-8208-5
- [52] A.V.Liapidevskiy, V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin, V.I. Gololobov. Modelling researches of the limitations for fault-tolerance measurements of ultra small displacements and vibrations. 2012. Proceedings of the 2nd IASTED Asian Conference on Modelling, Identification, and Control, Asia-MIC 2012 P.1-11, DOI: 10.2316. P.2012.769–026.
- [53] В.А. Васильев, В.А. Жмудь, Ю.Н. Ильинович, В.М. Семибаламут, Ю.Н. Фомин. Детектирование приращения текущей фазы в лазерном измерителе малых вибраций на больших базовых расстояниях. ПТЭ, 2002, N 3, с.98–100.
- [54] В.А. Жмудь. Широкополосная высокочувствительная фазометрия для лазерных виброметров. Сб. научн. трудов НГТУ 2002, Новосибирск, N 1(27), с.97–102.
- [55] Орлов В.А., Фомин Ю.Н., Семибаламут В.М., Терешкин Д.О., Жмудь В.А. Комплекс для измерения сверхмалых приливных деформаций скальных пород на основе He-Ne-лазера. Автоматика и программная инженерия. 2014. № 3 (9). С. 54–65. НГТУ, ИЛФ, Геофизическая служба СО РАН (Новосибирск, Россия).
- [56] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics. Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Новосибирск, НГТУ. pp. 176–183.
- [57] V.A. Orlov, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The essence of the laser methods and optic setup structures for the monitoring of Earth seismic dynamics. 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.67–72.
- [58] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Система стабилизации частоты излучения лазера. Патент на изобретение. RU 2431909 C2, МКП H01S 3/10 (2006.01). Заявка 2009137713/28 от 12.10.2009. Дата начала срока действия 12.10.2009. дата подачи заявки 12.10.2009. дата публикации заявки: 20.04.2011. Бюл. №11. Опубликовано 20.10.2011, бюл. № 29. Правообладатель: Учреждение РАН СО РАН ИЛФ.
- [59] 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.39–42.
- [60] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. 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.43–46.
- [61] С.В. Бармасов, В.А. Жмудь, А.А. Воевода. Фазовая стабилизация частоты биений двух идентичных лазеров для спектроскопии. Автометрия, 1999, N 2, с.78–83.
- [62] В.А. Жмудь, С.В. Бармасов, В.Д. Гительсон. Электронная система стабилизации частоты He-Ne лазера по линиям поглощения метана. ПТЭ, 1999г. N 4, с.127–133.
- [63] Бармасов С.В., Жмудь В.А. Аппаратура для фазовой автоподстройки разностной частоты двух лазеров. ПТЭ, 2000, N3, с.104–106.
- [64] В.А. Жмудь. Метод разделения движений для подавления возмущений в лазерных системах. Автометрия, 2002, N5, с.119-126.
- [65] В.А. Жмудь. Частотные измерения в прецизионных лазерных системах. Научный вестник НГТУ. - 2002. - N 2(13). с.127-136.
- [66] Гончаренко А.М., Васильев В.А., Жмудь В.А. Метод повышения чувствительности лазерных виброметров. Автометрия, 2003 (39), N 2, с.43–47.
- [67] Воевода А.А., Жмудь В.А. Системы фазовой автоподстройки частоты для лазерных спектрометров Сб. научн. трудов НГТУ, 1998 N 1 (10), с.15–24.
- [68] Бугров С.В., Жмудь В.А., Семибаламут В.М. Однополосная стабилизация лазерного излучения. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2009. 1(55). С. 86–91.
- [69] Жмудь В.А., Печурин В.А. Снижение дрейфа тракта синхронного детектора при стабилизации частоты лазера - Сб. научн. трудов НГТУ 1999, Новосибирск, N 3(16), с.141–144.
- [70] V.A. Zhmud', S. Ayoub, V. Hassouneh. frequency Feedback laser systems. Proceedings of the IASTED International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp.338-341.
- [71] A.A. Voevoda, A.S. Farnosov, V.A. Zhmud'. High-speed phase-locked-loop frequency control of identical lasers. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 346–351.
- [72] В.А. Воевода, В.Д. Гительсон, В.А. Жмудь. Фазовая автоподстройка частоты лазерного излучения. Сборник научных трудов НГТУ, 2004. N 4 (38). С. 21–28.
- [73] Gitelson V.D., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Phase locking of laser frequency for metrological systems. Proceedings of Second IASTED international Multi-Conference Automation, Control and Applications (ACIT-ACA). 2005. Novosibirsk. Russia. P.399–403.
- [74] В.А. Жмудь. Интерферометр. Патент № 107346. Правообладатель: ИЛФ. Заявка № 2011100243, приоритет от 11 января 2011 г., зарег. в Гос. реестре 10.08.2011 г., срок действия 11.01.2021 г. Опубликовано в бюл.е №22, 10.08.2011. МПК G01 B 9/02 (2006.01).
- [75] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для системы с обратной связью. Патент РФ RU 2368933 C1. G05B 11/14. Опубл.27.09.09. Бюл. № 27. Заявка № 2008110243, Правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [76] В.А. Жмудь, А.А. Воевода, В.М. Семибаламут, Р.Ю. Ишимцев. Регулятор для многомерного объекта. Патент РФ RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Опубл.10.05.10. Бюл. № 27. Заявка №

- 2009138894/22 от 20.10.2009, правообладатель: ГОУ ВПО Новосибирский государственный технический университет и Институт лазерной физики СО РАН.
- [77] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут. Регулятор для систем с обратной связью. Патент РФ RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Опубл. 27.09.08. Бюл. № 27. Заявка № 2008108410/22 от 04.03.2008, правообладатель: Институт лазерной физики СО РАН.
- [78] Жмудь В.А., Ядрышников О.Д., Заворин А.Н., Полищук А.В. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. Патент на изобретение № 2522899. МПК G05D 1/00 (2006.01). Заявка № 2012152697. Приоритет от 06.12.2012. Зарегистрировано в реестре изобретений РФ 21.05.2014. Срок действия до 06.12.2032. Правообладатель НГТУ.
- [79] В.А. Жмудь, В.М. Семибаламут, А.А. Воевода. Адаптивная система для регулирования и стабилизации физических величин. Патент на изобретение RU № 2457529. Заявка № 2011100407. Зарегистрировано 27.07.2012. Правообладатель: ИЛФ.
- [80] В.А. Васильев, А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Новые подходы к разработке адаптивных цифровых ПИД-регуляторов. Сборник научных трудов НГТУ, 2006. N 3 (45). С. 11–18.
- [81] Жмудь В.А., Кирдянов И.Н. Высоковольтный операционный усилитель для пьезокерамического модулятора длины газовых и твердотельных лазеров - ПТЭ, 1998, N 1, с.150–151.
- [82] А.К. Дмитриев, В.А. Жмудь, М.В. Охупкин. Лазерная спектроскопия, свободная от квадратичного эффекта Доплера. Информационный бюллетень РФФИ. 1994. Т. 2. № 2. С. 355.
- [83] А.К. Дмитриев, Д.Г. Бабушкин, С.В. Бармасов и др. Нелинейная лазерная спектроскопия на компонентах дублета отдачи. Информационный бюллетень РФФИ. 1997. Т. 5. № 2. С. 538.
- [84] А.К. Дмитриев, Д.Г. Бабушкин, С.В. Бармасов и др. Нелинейная лазерная спектроскопия на компонентах дублета отдачи. Информационный бюллетень РФФИ. 1999. Т. 7. № 2. С. 374.
- [85] А.А. Воевода, В.А. Жмудь, С.В. Бармасов. Прецизионное управление лазерным спектрометром с помощью синтезаторов частоты, персональной ЭВМ и цифроаналогового интерфейса. - Сб. научн. трудов НГТУ 1998, Новосибирск, N 4(13), с.145–152.
- [86] В.А. Жмудь, В.А. Печурин. Прецизионное управление гетеродинным лазерным спектрометром. Четвертый сибирский конгресс по промышленной и прикладной математике (ИНПРИМ-2000). Тезисы докладов. Часть IV. Новосибирск, изд-во Института математики СО РАН, с.25.
- [87] А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Синтез управления для системы АПЧ оптимального стандарта частоты на He-Ne/CH₄-лазере. Российская научно-техническая конференция «Информатика и проблемы телекоммуникации» - тез. Докл. т.2., с.26–27. Новосибирск, 1996
- [88] Б.Д. Борисов, В.А. Васильев, А.М. Гончаренко, В.А. Жмудь. Методика оценки стабильности стандартов частоты. Автотметрия, 2002, N 3, с.104–112.
- [89] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov et al. Absolute frequency measurements in precision laser spectroscopy of Muonium. SPIE Proceedings Vol. 3736, ICONO '98: Quantum Optics, Interference Phenomena in Atomic Systems, and High-Precision Measurements, Paper N: 3736-36, ISBN: 0-8194-3210-5, 452 pages Published 1999, Meeting Date: 06/29 - 07/03/98, Moscow, Russia pp.310–318.
- [90] А.А. Воевода, В.А. Жмудь. Возможные пути повышения кратковременной стабильности лазерных стандартов частоты. Вестник НГУ. Серия: Физика. 2007. Т.2, вып.2. Квантовая оптика, квантовая электроника. С.36–39.
- [91] В.А. Жмудь. Разработка автоматизированной системы адаптивного управления спектрометром сверхвысокого разрешения и мобильного стандарта частоты на его основе. - Гос. научно-техническая программа «Фундаментальная метрология» - Сб. отчетов за 1996 г. Новосибирск, 1996, с.158–162.
- [92] V.A. Zhmud'. Estimation of the instability of the Laser frequency Standards. Proceedings of the IASTED International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp. 9–13.

Scientific School of Academician S.N. Bagaev. On the Anniversary of the Founder

V.A. ZHMUD

This year, at the 9-th of September, we celebrate the 75-years Anniversary of the director of Institute of Laser Physics SB RAS, academician of Russian Academy of Sciences, Sergey Nikolayevich Bagaev.

At the same year, we celebrated the 20 years of the Institute of Laser Physics SB RAS, many years leading by Sergey Bagaev.

S.N Bagaev has initiated, organized and accomplished many important science researches on the field of laser physics, quantum electronics, non-linear and quantum optics.

Under his supervision many great projects were done. Laser basic metrology, laser medicine, laser technology and laser communication techniques, super precision micro displacements measurer and laser cutting setup, femtosecond laser, optical clocks, ultra-high power femtosecond lasers and many other various devices on the base of solid, gas and semiconductor lasers. The list of the developments of his institute, under his science supervision, becomes greater with each year.

With his great science and organizing contribution the Faculty of Physics and Techniques was reorganized. He with his science staff has organized the Department of Laser Systems in NSTU, which already has its reach history and many significant results.

He is chairperson of the Dissertation Council, which takes to defend the dissertations on the specialties “Laser Physics” and “Optics”. Under his science supervision, many scientists prepared and defended their dissertations. Many of them work in NSTU. Among them, there are Professor A.K. Dmitriev, dean of the Faculty of Physics and Techniques, professors Ye.A. Titov, M.N. Skvortsov, A.M. Razhev and many others. Total amount of them is 10 Doctors of sciences and about 30 Mastres of sciences (PhD).

Many authors of the papers published in these Proceedings consider Sergey Nikolayevich Bagaev as their science supervisor. Among they are professors V.A. Zhmud and V.A. Orlov, deputy-professor V.M. Semibalamut, Dr. Yu. N. Fomin, aspirant D.O. Tereshkin.

We all warmly congratulate academician S. N. Bagaev with the Anniversary and wish him health and successes.

REFERENCES

- [1] Sergej Nikolaevich Bagaev. Kvantovaja jelektronika. 2001. T. 31, № 10. S. 940. <http://www.quantum->

- electron.ru/php/paper_rus.phtml?journal_id=qe&paper_id=2114
- [2] Википедия: Bagaev Sergej Nikolaevich. https://ru.wikipedia.org/wiki/Bagaev,_Sergej_Nikolaevich
- [3] V.A. Zhmud'. Precizionnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem. Ucheb. Posobie. Novosib. gos. un-t. Novosibirsk, 2005. 152 s.
- [4] V.A. Zhmud'. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. Posobie. Novosib. gos. tehn. in-t. Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. 116 c.
- [5] V. A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: special'nye glavy. Uchebnoe posobie. Novosibirsk. Izdatel'stvo NGU. 2010. 198 s.
- [6] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 1998. Ch.1. 63 s.
- [7] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 1999. Ch.2. 55 s.
- [8] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2000. Ch.3. 50 s.
- [9] V.A. Zhmud'. Jelektronnye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: Ucheb. posobie. - Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2002. Ch.4. 64s.
- [10] S.N. Bagaev, A.M.Belkin, A.S.Dychkov et al. Ultrastable, compact diode-pumped Nd:YAG-laser for precision measurements. QELS'1995, P.172–173.
- [11] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. MPLP'97 - The second International symposium on Modern problem of laser physics. Novosibirsk, Russia, July 28 - August 2, 1997, pp. P111–P112.
- [12] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Absolute frequency measurement of molecular Iodine reference line near 732 nm used for high precision spectroscopy of Muonium. Rossijsko-Germanskij lazernyj simpozium - Novosibirsk, 27.06 - .07.97 - Technical digest - p.P12–P13
- [13] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency standard at 732 nm based in iodine hyperfine transition used for high precision laser spectroscopy of Muonium. - MPLP'97 - Proceedings of the Second Int. Symposium on Modern Problem of Laser Physics: v.1, pp.377–386. Novosibirsk, 1997.
- [14] S.N. Bagaev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov, et al. Frequency reference in the 732-nm region for precision laser spectroscopy of muonium. Quantum Electronics. 2000. T. 30. № 7. S. 641–646.
- [15] S.N. Bagaev, A.S. Dychkov, A.S. Efimov i dr. Sozdanie absoljutnogo standartata chastoty dlja jeksperimentov po precizionnoj spektroskopii mjuonija. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1996. T. 4. № 2. S. 1095.
- [16] S.N. Bagayev, S.V. Chepurov, A.S. Dychkov et al. Femtosecond optical clock for precise measurements. Technical Digest. V International Symposium 'Modern Problem of Laser Physics'- MPLP'2008 – Novosibirsk. P.61.
- [17] V. D. Gitelson, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud. A frequency-selective system for stabilizing the diode-laser radiation power without operating-point shift. Instruments and Experimental Techniques. Volume: 52. Issue: 1. P. 122–128 Published: JAN 2009.
- [18] A.S.Efimov, V.A.Zhmud', I.V. Padjukov. Precizionnyj istochnik toka dlja poluprovodnikovogo lazera. Avtometrija, 1997, N 3 s.111–115.
- [19] V.A. Zhmud', I.V. Padjukov. Precizionnaja mikroprocessornaja sistema stabilizacii temperatury. Avtometrija. 1997, N 5, s. 115–120.
- [20] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud', A.L. Solov'ev. Cifrovaja sistema termostabilizacii poluprovodnikovogo lazera: matematicheskaja model' i uslovija poluchenija optimal'nogo perehodnogo processa. Avtometrija. N 3, 2000. C.109–121.
- [21] A.S. Efimov, V.A. Zhmud', D.Ju. Ivashko, I.V. Padjukov. Precizionnoe upravlenie poluprovodnikovymi lazerami. PTJe, 2000g. N 4, s.105–110.
- [22] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud'. Sistema termostabilizacii diodnogo lazera. PTJe, 2000g. N 4, s.158–159.
- [23] V.A. Zhmud', A.G. Sokolov. Istochnik impul'snogo toka dlja inzhekcionnyh poluprovodnikovyh lazerov. PTJe, 2000, N2, s.155–156
- [24] V.A. Zhmud'. Avtomatizirovannye sistemy upravlenija poluprovodnikovymi lazerami dlja precizionnoj spektroskopii. Gos. nauchno-tehnicheskaja pro-programma «Fundamental'naja metro-logija» - Sb. otchetov za 1997 g. Novo-si-birsk, 1998, s.173–177.
- [25] D.O. Tereshkin, V.A. Hlichkin, V.A. Zhmud'. Identifikacija termoelektricheskoj batarei s datchikom temperatury dlja termostatirovanija diodnogo lazera. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. - 2007. - № 3(49). S.137–140.
- [26] Gitel'son V.D., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Chastotno-izbiratel'naja stabilizacija moshhnosti izluchenija diodnogo lazera bez smeshhenija rabochej točki. PTJe. 2009. N1. s.135-141.
- [27] A.A.Voevoda, V.A. Zhmud', D.Ju. Ivashko i dr. Avtomatizirovannyj stend dlja snjatija vatt - ampnyh harakteristik poluprovodnikovogo lazera pri razlichnyh temperaturah. ch.1. Sb. nauchn. trudov NGTU, 1997 N 3 (8), s.91–96. ch.2. Sb. nauchn. trudov NGTU, 1997, N 4 (9), s. 41–46.
- [28] V.A. Zhmud', A.G. Sokolov. Issledovanie pomeh v cepi diodnogo lazera. Nauchnyj vestnik NGTU, 2004, N 2(17), s.83–92.
- [29] V.D. Gitel'son, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Aktivnoe podavlenie polosovyh шумов полупроводникового лазера без смешения рабочей точки. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2007. 4(50). S.149–154.
- [30] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud', A.M. Goncharenko. Cifrovaj chastotomer. Patent RF N 2210785 (prioritet ot 13.07.01.) Opubl.: Gos. reestr izobretenij RF. Bjull. N23, 20.08.03. G01 R25/00, H03 D13/00
- [31] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud', A.M. Goncharenko. Preobrazovatel' masshtaba vremeni. Patent RF N 2210783 (prioritet ot 20.08.01.) Opubl.: Gos. reestr izobretenij RF. Bjull. N23, 20.08.03. G01 R23/00
- [32] A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud'. Cifrovaj chastotomer. Patent RF na izobretenie N2278390. G01R 23/02. Opubl. Bjull. N17, ot 20.06.06.
- [33] A.M. Goncharenko, V.A. Vasil'ev, V.A.Zhmud'. Fazometr s geterodinnym preobrazovanijem chastoty. Patent RU 2225012: H03D13. G01R25, G01R 21/00; G01R 29/02; H03D. Vladel'cy patenta: Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [34] V.A. Zhmud', A.M. Goncharenko. Precizionnyj chastotomer dlja fundamental'noj metrologii. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2014. № 2 (8). S. 73–80.
- [35] A.M.Goncharenko, S.V.Bugrov, V.A.Zhmud'. Monitoring fazovyh prirashhenij preryvistogo signala. Vestnik NGU. Serija: Fizika. 2007. Tom 2. Vypusk 1, s. 61-64. ISSN 1818-7994.
- [36] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, V.M. Semibalamut, A.M. Goncharenko, S.V. Bugrov. Fazometr s geterodinnym preobrazovanijem chastoty. Patent na izobretenie №2470312. Zajavka: 2010139880/28, 28.09.2010. Opublikovano: 20.12.2012. Patentoobladateli: NGTU, ILF
- [37] A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud', S.A. Avilov. Fast 3-Channel Precision Frequency Meter – Time Analyzer with Zero Dead Time Interval. Technical Digest of MPLP-2004 IV Int. Sympos. on Modern Problem of Laser Physics, Novosibirsk, Russia, August 22-27, 2004. P.290 – 291.
- [38] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, A.M. Goncharenko. Mnogokanal'nyj precizionnyj bystrodejstvujushhij chastotomer. Nauchnyj vestnik NGTU. 2005. N 1(19). S. 73–82.
- [39] V.A. Zhmud'. Precizionnye izmerenija chastoty dlja attestacii chastotnyh standartov. Avtomatika i programmaja inzhenerija. 2014. 1(7). S. 104–119.
- [40] A.S. Efimov, V.A. Zhmud'. Sintezator chastoty so sverhmalym shagom dlja sistem chastotnoj i fazovoj avtopodstrojki. Avtometrija. 1996. N 2. s. 21–25.
- [41] A.S.Efimov, V.A. Zhmud'. Cifrovaj sinhronnyj detektor s generatorom medlennogo signala. PTJe, 2000, N3, s.45–48.
- [42] A.M. Goncharenko, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Attestacija trehkanal'nogo precizionnogo bystrodejstvujushhego chastotomera // Nauchnyj vestnik NGTU. 2005. N 2. s. 175–178.
- [43] S.V. Bugrov, A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud', A.A.

- Voevoda. Programmnoe obespechenie i funkcional'nye vozmozhnosti mnogokanal'nogo precizionnogo vysokoskorostnogo chastotomera. Nauchnyj vestnik NGTU. - 2006. - N 3(24). s.171–178.
- [44] A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, S.A. Avilov. Mikroprocessornyj precizionnyj trehkanal'nyj vysokoskorostnyj chastotomer bez «mertvogo vremeni». Pribory i tehnika jeksperimenta. 2007. N2. s. 78–83.
- [45] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernyh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. ch.1. Nauchnyj vestnik NGTU. 2009. N 4(37). S.25–32.
- [46] Voevoda A.A., Goncharenko A.M., Zhmud' V.A. Fazometry dlja radiochastotnyh i lazernyh izmeritelej peremeshhenij i vibracij. ch.2. Nauchnyj vestnik NGTU. 2010. N 1(38). S.35–74.
- [47] Goncharenko A.M., Zhmud' V.A., Precizionnyj vysokochastotnyj fazometr dlja izmerenija nanovibracij. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2009. 1(55). S. 108–117.
- [48] Goncharenko A.M., Bugrov S.V., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Metrologicheskie ispytaniya cifrovogo precizionnogo fazometra. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2009. 2(56). S. 109–114.
- [49] B.D. Borisov, A.M. Goncharenko, V.A. Vasiliev, V.A. Zhmud'. Precise measurements of high-stable lasers radiation frequency and phase. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900, pp. 162–166.
- [50] Modification of software for the control of laser measurer of super small deformations. Zhmud, V., Tereshkin, D. 2013. 8th International Forum on Strategic Technology 2013, IFOST 2013 - Proceedings P. 260–264.
- [51] S.V. Bugrov, V.A. Zhmud', E.V. Prohorenko, A.M. Goncharenko. Metody i sredstva nanovibrometrii. Materialy X Mezhdunarodnoj konferencii «Aktual'nye problemy jelektronnogo priborostroeniya» APJeP – 2010 v 7 tt. t.3. Novosibirsk. Izd-vo NGTU. S.119–123. ISBN: 978-1-4244-8208-5
- [52] A.V.Liapidevskiy, V.A. Zhmud, D.O. Tereshkin, V.I. Gololobov. Modelling researches of the limitations for fault-tolerance measurements of ultra small displacements and vibrations. 2012. Proceedings of the 2nd IASTED Asian Conference on Modelling, Identification, and Control, Asia-MIC 2012 P.1-11, DOI: 10.2316. P.2012.769–026.
- [53] V.A. Vasil'ev, V.A. Zhmud', Ju.N. Il'janovich, V.M. Semibalamut, Ju.N. Fomin. Detektirovanie prirashhenija tekushhej fazy v lazernom izmeritele malyh vibracij na bol'shih bazovyh rasstojanijah. PTJe, 2002, N 3, s.98–100.
- [54] V.A. Zhmud'. Shirokopolosnaja vysokochuvstvitel'naja fazometrija dlja lazernyh vibrometrov. Sb. nauchn. trudov NGTU 2002, Novosibirsk, N 1(27), s.97–102.
- [55] Orlov V.A., Fomin Ju.N., Semibalamut V.M., Tereshkin D.O., Zhmud' V.A. Kompleks dlja izmerenija sverhmalyh prilivnyh deformacij skal'nyh porod na osnove He-Ne-lazera. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2014. № 3 (9). S. 54–65. NGTU, ILF, Geofizicheskaja sluzhba SO RAN (Novosibirsk, Rossija).
- [56] V.A. Orlov, M.D. Parushkin, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The usability of the laser methods in monitoring of Earth seismic dynamics. Proceedings of DST-RFBR-Sponsored Second Indo-Russian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics. NSTU, Novosibirsk, Russia. 9th – 12th September 2011. Novosibirsk, NGTU. pp. 176–183.
- [57] V.A. Orlov, D.O. Tereshkin, Yu.N. Fomin, V.A. Zhmud. The essence of the laser methods and optic setup structures for the monitoring of Earth seismic dynamics. 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.67–72.
- [58] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Sistema stabilizacii chastoty izluchenija lazera. Patent na izobrenie. RU 2431909 C2, MKP H01S 3/10 (2006.01). Zajavka 2009137713/28 ot 12.10.2009. Data nachala sroka dejstvija 12.10.2009. data podachi zajavki 12.10.2009. data publikacii zajavki: 20.04.2011. Bjul. №11. Opublikovano 20.10.2011, bjul. № 29. Pravoobladatel': Uchrezhdenie RAN SO RAN ILF.
- [59] 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.39–42.
- [60] V. A. Zhmud. Possible ways of the development of the phase laser stabilization techniques: tasks and methods of the decision. 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.43–46.
- [61] S.V. Barmasov, V.A. Zhmud', A.A. Voevoda. Fazovaja stabilizacija chastoty bjenij dvuh identichnyh lazerov dlja spektrometrii. Avtometrija, 1999, N 2, s.78–83.
- [62] V.A. Zhmud', S.V. Barmasov, V.D. Gitel'son. Jelektronnaja sistema stabilizacii chastoty He-Ne lazera po linijam pogloshhenija metana. PTJe, 1999g. N 4, s.127–133.
- [63] Barmasov S.V., Zhmud' V.A. Apparatura dlja fazovoj avtopodstrojki raznostnoj chastoty dvuh lazerov. PTJe, 2000, N3, s.104–106.
- [64] V.A. Zhmud'. Metod razdelenija dvizhenij dlja podavlenija vozmushhenij v lazernyh sistemah. Avtometrija, 2002, N5, c.119-126.
- [65] V.A. Zhmud'. Chastotnye izmerenija v precizionnyh lazernyh sistemah. Nauchnyj vestnik NGTU. - 2002. - N 2(13). s.127-136.
- [66] Goncharenko A.M., Vasil'ev V.A., Zhmud' V.A. Metod povyshenija chuvstvitel'nosti lazernyh vibrometrov. Avtometrija, 2003 (39), N 2, s.43–47.
- [67] Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Sistemy fazovoj avtopodstrojki chastoty dlja lazernyh spektrometrov Sb. nauchn. trudov NGTU, 1998 N 1 (10), s.15–24.
- [68] Bugrov S.V., Zhmud' V.A., Semibalamut V.M. Odnopolosnaja stabilizacija lazernogo izluchenija. Sbornik nauchnyh trudov NGTU. Novosibirsk. 2009. 1(55). S. 86–91.
- [69] Zhmud' V.A., Pechurin V.A. Snizhenie drejfa trakta sinhronnogo detektora pri stabilizacii chastoty lazera - Sb. nauchn. trudov NGTU 1999, Novosibirsk, N 3(16), s.141–144.
- [70] V.A. Zhmud', S. Ayoub, V. Hassuoneh. frequency Feedback laser systems. Proceedings of the IASTED International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp.338-341.
- [71] A.A. Voevoda, A.S. Farnosov, V.A. Zhmud'. High-speed phase-locked-loop frequency control of identical lasers. Proceedings of SPIE, Novosibirsk, 2002, vol.4900. pp. 346–351.
- [72] A.A. Voevoda, V.D. Gitel'son, V.A. Zhmud'. Fazovaja avtopodstrojka chastoty lazernogo izluchenija. Sbornik nauchnyh trudov NGTU, 2004. N 4 (38). S. 21–28.
- [73] Gitelson V.D., Voevoda A.A., Zhmud' V.A. Phase locking of laser frequency for metrological systems. Proceedings of Second IASTED international Multi-Conference Automation, Control and Applications (ACIT-ACA). 2005. Novosibirsk. Russia. P.399–403.
- [74] V.A. Zhmud'. Interferometr. Patent № 107346. Pravoobladatel': ILF. Zajavka № 2011100243, prioritet ot 11 janvarja 2011 g., zareg. v Gos. reestre 10.08.2011 g., srok dejstvija 11.012021 g. Opublikovano v bjul.e №22, 10.08.2011. MPK G01 B 9/02 (2006.01).
- [75] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja sistemy s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 2368933 S1. G05B 11/14. Opubl.27.09.09. Bjul. № 27. Zajavka № 2008110243, Pravoobladatel': Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [76] V.A. Zhmud', A.A. Voevoda, V.M. Semibalamut, R.Ju. Ishimcev. Reguljator dlja mnogomernogo ob#ekta. Patent RF RU 93994 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.10.05.10. Bjul. № 27. Zajavka № 2009138894/22 ot 20.10.2009, pravoobladatel': GOU VPO Novosibirskij gosudarstvennyj tehnickij universitet i Institut lazernoj fiziki SO RAN.
- [77] V.A. Zhmud', V.M. Semibalamut. Reguljator dlja sistem s obratnoj svjaz'ju. Patent RF RU 76719 U1. G01R 23/02, G01P 3/36. Opubl.27.09.08. Bjul. № 27. Zajavka № 2008108410/22 ot 04.03.2008, pravoobladatel': Institut

- lazernoj fiziki SO RAN.
- [78] Zhmud' V.A., Jadrishnikov O.D., Zavorin A.N., Polishhuk A.V. Adaptivnaja sistema dlja regulirovanija i stabilizacii fizicheskikh velichin. Patent na izobretenie № 2522899. MPK G05D 1/00 (2006.01). Zajavka № 2012152697. Prioritet ot 06.12.2012. Zaregistrovano v reestre izobretenij RF 21.05.2014. Srok dejstvija do 06.12.2032. Pravoobladatel' NGTU.
- [79] V.A.Zhmud', V.M. Semibalamut, A.A. Voevoda. Adaptivnaja sistema dlja regulirovanija i stabilizacii fizicheskikh velichin. Patent na izobretenie RU № 2457529. Zajavka № 2011100407. Zaregistrovano 27.07.2012. Pravoobladatel': ILF.
- [80] V.A. Vasil'ev, A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Novye podhody k razrabotke adaptivnyh cifrovych PID-reguljatorov. Sbornik nauchnyh trudov NGTU, 2006. N 3 (45). S. 11–18.
- [81] Zhmud' V.A., Kirdjanov I.N. Vysokovol'tnyj operacionnyj usilitel' dlja p'ezokeramicheskogo moduljatora dliny gazovyh i tverdotel'nyh lazerov - PTJe, 1998, N 1, s.150–151.
- [82] A.K.Dmitriev, V.A.Zhmud', M.V. Ohapkin. Lazernaja spektroskopija, svobodnaja ot kvadraticnogo jeffekta Doplera. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1994. T. 2. № 2. S. 355.
- [83] A.K. Dmitriev, D.G.Babushkin, S.V. Barmasov i dr. Nelinejnaja lazernaja spektroskopija na komponentah dubleta ot dachi. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1997. T. 5. № 2. S. 538.
- [84] A.K. Dmitriev, D.G.Babushkin, S.V. Barmasov i dr. Nelinejnaja lazernaja spektroskopija na komponentah dubleta ot dachi. Informacionnyj bjulleten' RFFI. 1999. T. 7. № 2. S. 374.
- [85] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud', S.V. Barmasov. Precizionnoe upravlenie lazernym spektrometrom s pomoshh'ju sintezatorov chastoty, personal'noj JeVM i cifroanalogovogo interfejsa. - Sb. nauchn. trudov NGTU 1998, Novosibirsk, N 4(13), s.145–152.
- [86] V.A.Zhmud', V.A. Pechurin. Precizionnoe upravlenie geterodinnym lazernym spektrometrom. Chetvertyj sibirskij kongress po industrial'noj i prikladnoj matematike (INPRIM-2000). Tezisy dokladov. Chast' IV. Novosibirsk, izd-vo Instituta matematiki SO RAN, s.25.
- [87] A.A.Voevoda, V.A. Zhmud'. Sintez upravlenija dlja sistemy APCh optimal'nogo standarta chastoty na He-Ne/CH₄-lazere. Rossijskaja nauchno-tehnicheskaja konferencija «Informatika i problemy telekommunikacii» -tez. Dokl. t.2., s.26–27. Novosibirsk, 1996
- [88] B.D.Borisov, V.A.Vasil'ev, A.M. Goncharenko, V.A. Zhmud'. Metodika ocenki stabil'nosti standartov chastoty. Avtometrija, 2002, N 3, s.104–112.
- [89] S.N. Bagayev, A.M. Belkin, A.S. Dychkov et al. Absolute frequency measurements in precision laser spectroscopy of Muonium. SPIE Proceedings Vol. 3736, ICONO '98: Quantum Optics, Interference Phenomena in Atomic Systems, and High-Precision Measurements, Paper N: 3736-36, ISBN: 0-8194-3210-5, 452 pages Published 1999, Meeting Date: 06/29 - 07/03/98, Moscow, Russia pp.310–318.
- [90] A.A. Voevoda, V.A. Zhmud'. Vozmozhnye puti povyshenija kratkovremennoj stabil'nosti lazernych standartov chastoty. Vestnik NGU. Serija: Fizika. 2007. T.2, vyp.2. Kvantovaja optika, kvantovaja jelektronika. S.36–39.
- [91] V.A. Zhmud'. Razrabotka avtomatizirovannoj sistemy adaptivnogo upravlenija spektrometrom sverhvisokogo razreshenija i mobil'nyh standartom chastoty na ego osnove. - Gos. nauchno-tehnicheskaja programma «Fundamental'naja metrologija» - Sb. otchetov za 1996 g. Novosibirsk, 1996, s.158–162.
- [92] V.A. Zhmud'. Estimation of the instability of the Laser frequency Standards. Proceedings of the IASTED International Conference Automation, Control and Information technology. June 2002. Novosibirsk, Russia, ACTA Press, Anaheim, Calgary, Zurich, pp. 9–13.



Вадим Аркадьевич Жмудь, заведующий кафедрой Автоматики в Новосибирском государственном техническом университете, (Новосибирск, Россия), ведущий научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН, доктор технических наук, доцент, автор более чем 300 научных работ, включая более 20 патентов, 12 учебных пособий.
E-mail: zhmud@corp.nstu.ru

**VI. Дискуссии. Форум.
К сведению авторов.**

Содержание раздела:

- В.А. Жмудь. Системы автоматического управления высшей точности. ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия. Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 128–136.
- Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия». Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 137–139.

Системы автоматического управления высшей точности

В.А. Жмудь, НГТУ, Новосибирск

Аннотация: Системы автоматического управления (САУ) действуют по принципу отрицательной обратной связи. Обратная связь осуществляется путем измерения выходного сигнала (состояния) управляемого объекта, сравнением его с предписанным (требуемым) значением этого состояния, и использованием этой разницы, называемой ошибкой для формирования управляющего воздействия на объект. Таким образом, выход объекта влияет на вход объекта, что и порождает петлю управления или замкнутый контур управления. Отличие САУ высшей точности (САУ ВТ) состоит в том, что при их проектировании особое внимание уделяется проблемам достижения высокой точности управления. В данной работе даны основные понятия, проблематика и методы проектирования САУ ВТ.

Ключевые слова: Автоматика, управления, погрешность, ошибка, точность, стабилизация

ВВЕДЕНИЕ

Высшая точность САУ означает достижение погрешности намного меньше, чем 1 %, то есть на порядок и выше [1–4]. Это означает, что допустимая погрешность таких САУ не может превышать 0,1 %, а иногда и это – очень много.

При изучении курса САУ студенты привыкают судить о качестве системы по графику переходного процесса. В целом этот подход правилен. Но на полном графике переходного процесса (от начала до конца) погрешность в один процент не видна. Действительно, если, например, даже если использовать экран размерами в тысячу точек в высоту, то 0,1 % – это один пиксель, меньше, чем ширина линии. Не только методы проектирования, но даже и методы визуальной оценки результата по графикам переходных процессов для таких САУ следует пересмотреть.

1. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ ВЫСШЕЙ ТОЧНОСТИ

Все САУ используют принцип управления объектом по ошибке, то есть по отклонению выходной величины объекта от предписанного значения. Поскольку объект управляется по величине ошибки, может возникнуть ошибочное

ощущение, что если ошибки нет, то и управления нет. То есть достижение нулевого значения ошибки якобы делает систему неуправляемой. В этом нет никакого парадокса, поскольку если ошибка действительно равна нулю, то объект в этом состоянии не должен подвергаться воздействию, которое стремится изменить состояние объекта. Если же ошибка не равна нулю, то на объект следует воздействовать для изменения его состояния.

На самом деле все обстоит не столь однозначно и просто. Текущее состояние, измеряемое только значением выходного сигнала, еще гарантирует того, что объект в данный момент управляется успешно, поскольку может оказаться, что, несмотря на то, что выходное значение и равно предписанному, в этот момент скорость и направление изменения этого состояния далеки от желаемых. В этом случае объект в ближайшее время настолько быстро отклонится от этого предписанного значения, что вернуть его будет достаточно трудно или даже невозможно. Поэтому успешность управления состоит не только в достижении выходным состоянием требуемого значения, но и длительное удержание объекта в требуемом состоянии, а если требуемое состояние изменяется, то фактическое состояние должно изменяться точно так же. Поэтому даже если выходное состояние объекта совпадает с предписанным значением, это не означает, что на объект не следует воздействовать. Воздействие на объект зависит не только от ошибки управления, но и от ее производной по времени, а также от ее интеграла по времени. Регулятор осуществляет дифференцирование и интегрирование ошибки, выходной сигнал регулятора чаще всего представляет собой сумму трех компонент: пропорциональной, интегральной и дифференциальной. Такой регулятор носит название ПИД-регулятора.

Ошибку управления можно разделить на статическую и динамическую. Статическая ошибка – это наиболее низкочастотная (статическая) компонента отклонения значения выходного сигнала объекта от предписанного значения. Динамической ошибкой называют высокочастотную компоненту этого отклонения, то есть все виды отклонения, за исключением статической ошибки.

При этом в теории автоматического управления (ТАУ) считают, что датчик выходной величины объекта ошибки не имеет. Это происходит не от того, что специалисты по ТАУ верят в идеальность такого датчика, а потому, что учет ошибки датчика не возможен методами ТАУ. Ошибка датчика не может быть устранена регулятором, она внесет свой обязательный вклад в погрешность управления объектом. Поэтому, коль скоро устранение влияния ошибки невозможно, в ТАУ не имеет смысла обсуждать эту ошибку, достаточно предположить, что разработчики датчиков использовали все свои знания и умения для уменьшения этой ошибки.

Однако, разработчик системы не столь уж беспомощен. Во-первых, он может осуществить выбор типа датчика и осуществить учет его влияния. Во-вторых, используя, например, несколько датчиков одновременно, можно повысить точность системы в целом. В-третьих, в большинстве ситуаций разработчик регулятора и разработчик остальных электронных элементов системы – это одно и то же лицо, поэтому имеется возможность влияния на все электронные элементы системы, на их выбор, на схему их включения и так далее.

Кроме датчиков на точность работы системы оказывают влияние и приводы, то есть устройства, которые осуществляют формирование воздействия на объект. Регулятор лишь формирует электрический сигнал, а вид воздействия на объект может быть иным, не электрическим. Это может быть нагрев, механическое перемещение и так далее. Даже если воздействие на объект осуществляется электрическим путем, может оказаться, что воздействующий сигнал должен быть высоковольтным или сильноточным. В этом случае требуется усилитель напряжения или тока, или мощности (и напряжения, и тока). При проектировании регуляторов методами ТАУ на приводы обращают мало внимания, зачастую привод относят в неизменяемой части системы, то есть к объекту регулирования. Качество приводом может оказать существенное влияние на динамическую ошибку, а в некоторых случаях даже на статическую погрешность.

Весьма важный класс систем – системы настройки на экстремум, называемые в ТАУ также «экстремальные системы управления». В рамках курса ТАУ считается достаточным, чтобы ошибка в системе с течением времени стремилась к нулю, что обеспечивается устойчивостью системы. Иногда обращают внимание на качество переходного процесса, что требует отсутствие или малую величину перерегулирования, отсутствие или малую амплитуду и быстрое затухание колебаний, относительно малую длительность процесса и относительно малую остаточную (статическую) ошибку. В системах управления высшей точности зачастую требования столь серьезны,

что в обычном курсе ТАУ они даже в первом приближении не рассматриваются.

Пример 1. Требования к системе стабилизации частоты лазера.

Гелий-неоновый лазер формирует монохроматическое оптическое излучение в инфракрасной области частот F (длина волны приблизительно равна $\lambda = 3,39 \text{ мкм}$) с девиацией этого значения на уровне $\Delta F = 10 \text{ МГц}$. За счет обратной связи требуется стабилизировать частоту излучения с погрешностью менее $\delta F = 0,1 \text{ Гц}$. Исходная девиация в сто миллионов раз превышает допустимую остаточную девиацию. Известно, что статическая ошибка в системе за счет действия обратной связи уменьшается, кратность уменьшения равна статическому коэффициенту усиления контура. Соответственно, коэффициент усиления в этой системе должен быть не меньше $K_{\text{мин}} = \Delta F / \delta F = 10^8$.

Пример 2. Пусть требуется подавление шумовой девиации частоты (см. Пример 1) равное $\Delta F_1 = 1 \text{ МГц}$, происходящее в области звуковых частот (расчетное значение, например, $f = 10 \text{ КГц}$) до величины не более $\delta F = 0,1 \text{ Гц}$. Необходимо на этой основе сформулировать требования к логарифмической амплитудно-частотной характеристике (ЛАЧХ) системы. На основе этих данных следует сделать вывод, что ЛАЧХ системы в области от нулевых частот до частоты f должна располагаться выше $K_f = \Delta F / \delta F = 10^7$. На Рис. 1 показаны варианты соответствующей ЛАЧХ.

Согласно требованиям по Примеру 2, левая часть ЛАЧХ должна быть выше точки, положение которой задано частотой f и усилением K_f . В Примере 1 задается только минимальное значение самой крайней точки этой характеристики, которая находится слева в бесконечном удалении. Требование Примера 1 – это требование только к статической ошибке, которое относится к нулевой частоте. Требование Примера 2 – это требование к ошибке в полосе от нулевой частоты до частоты f .

Пример 3. Могут быть причины для того, чтобы выдвигать и такие требования, которые ограничивают ЛАЧХ сверху в некоторой области частот. Например, в сигнале, поступающем с датчика выходной величины объекта, может присутствовать помеха, существенно превышающая информативную часть сигнала в некоторой области частот. В этом случае необходимо, чтобы коэффициент усиления контура в области этих частот был много меньше единицы. Например, штриховая линия на Рис. 1 не удовлетворяет таким требованиям, а сплошная линия этим требованиям удовлетворяет.

Таким образом, зависимость требований к регулятору от требований к системе может быть весьма непростой. Мы увидели, что достаточно важными могут оказаться требования к ЛАЧХ условно **разомкнутого контура**. Наряду с этим

обязательно имеются определенные требования к амплитудно-фазовой характеристике этого контура (ЛФЧХ).

Эти две характеристики всегда принимаются во внимание при расчете регулятора и являются основой такого расчета. Наряду с ними следует принимать в расчет и особенности датчиков,

такие как их статическая ошибка (смещение), их динамическая ошибка, шумы, дрейф смещения (дрейф во времени и тепловой дрейф) и так далее.

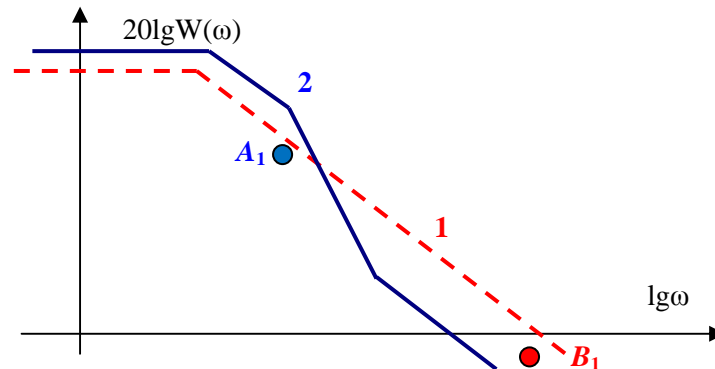


Рис. 1. Варианты ЛАЧХ, охватывающей критическую точку A_1 (линия 2 при этом не охватывает точку B_1): по оси абсцисс – логарифм частоты, по оси ординат – логарифм усиления

Для линейных систем наиболее эффективен аппарат частотных комплексных характеристик или связанный с ними аппарат преобразований Лапласа. Аргументом преобразования Лапласа является комплексный параметр s , а для частотных характеристик применяется его мнимая часть, т. е. частота. Типичная

структурная схема замкнутой системы управления показана на Рис. 2, где в прямоугольниках записаны частотные характеристики отдельных звеньев, а также применены типовые обозначения сигналов в системе [1–4].

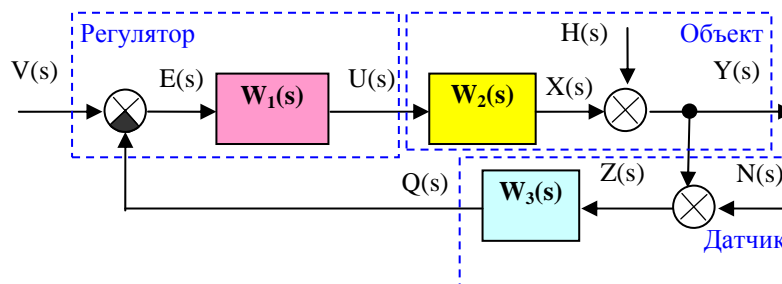


Рис. 2. Расчетная структурная схема САУ ВТ

А именно: $y(t)$ – выходная величина объекта; $v(t)$ – предписанное значение выходной величины (задание); $u(t)$ – управляющий сигнал, подаваемый регулятором на объект; $h(t)$ – возмущение, действующее на объект, приведенное к единицам выходной величины; $x(t)$ – состояние объекта, т.е. такое значение его выходной величины, которое было бы при отсутствии возмущения; $e(t)$ – ошибка управления; $n(t)$ – шум измерения выходной величины; $z(t)$ – результат измерения выходной величины; $q(t)$ – выходной сигнал датчика величины $y(t)$. Кроме того, применяется традиционная замена строчных букв на прописные при замене функций времени на их операторное преобразование, например, $V(s)$ – преобразование от сигнала $v(t)$. Преобразование Лапласа от константы есть $1/s$. Поскольку, как правило, сами операторные значения входных, выходных и промежуточных сигналов не

используются для вычислений, а используются лишь их отношения, т. е. передаточные функции, то сложилась практика использования модифицированного преобразования, а именно Лапласа–Карсона, которое получается умножением на s , вследствие чего образ константы есть также константа. На значения передаточных функций это не влияет, поэтому мы будем использовать терминологию преобразований Лапласа.

Структурная схема Рис. 2 – графическое отображение взаимосвязей сигналов, которое может быть заменено следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} E(s) &= V(s) - Q(s); & U(s) &= W_1(s)E(s); \\ X(s) &= W_2(s)U(s); & Y(s) &= X(s) + H(s); \\ Z(s) &= Y(s) + N(s); & Q(s) &= W_3(s)Z(s). \end{aligned}$$

При решении этой системы относительно любой из величин внутри контура (например, зависимость Y от V , N и H) в результате неизбежно появляется рациональная дробь, причем, знаменатель этой дроби всегда один и тот же, и он равен

$$W_{OC} = 1 + W_1(s)W_2(s)W_3(s). \quad (1)$$

Например, выходная величина определяется соотношением:

$$Y(s) = W_V(s)V(s) + W_H(s)H(s) + W_N(s)N(s). \quad (2)$$

При этом

$$W_V(s) = [W_{OC}(s) - 1] / W_{OC}(s), \quad (3)$$

$$W_H(s) = -1 / W_{OC}(s), \quad (4)$$

$$W_N(s) = -[W_{OC}(s) - 1] / W_{OC}(s). \quad (5)$$

Если (1) стремится к бесконечности, то соотношение (3) стремится к единице, а соотношение (4) стремится к нулю. Это означает, что выходная величина ставится равной входной величине. Это можно найти в любом учебнике по теории автоматического управления. Но следует обратить внимание также и на соотношение (5), которое в этих же условиях стремится к минус единице. Это означает, что погрешность датчика со знаком минус добавляется к выходной величине, то есть порождает ошибку, которую система автоматического управления никак не подавляет. **Ошибка измерения дает ошибку управления.**

Если же (1) обращается в ноль, то все передаточные функции (3), (4) и (5) обращаются в бесконечную величину. Это означает, что любые сколь угодно малые входные сигналы (шум, задание, или возмущение) вызывают «сколь угодно большие» выходные сигналы, а с учетом поправки на физическую реализуемость это означает, что система вместо того, чтобы находиться в равновесном состоянии, движется к максимально возможному отклонению от него или совершает колебательные движения с максимально достижимой амплитудой.

Для предотвращения этой ситуации как раз и требуется регулятор, расчету которого посвящена вся теория автоматического управления.

Для исследования устойчивости системы необходимо исследовать взаимосвязь динамических моделей элементов, входящих в систему. Действительно, если две различные системы описываются идентичными математическими моделями, то и их выходные сигналы должны быть одинаковыми при совпадении входных сигналов.

Эффективный способ исследования замкнутых систем – моделирование этих систем. Например, программное обеспечение *VisSim* позволяет реализовать математические модели подавляющего большинства известных динамических звеньев, а также осуществить

соответствующие связи сигналов с выходов на входы и сформировать необходимые входные сигналы. Поэтому запуск имитационного моделирования обеспечивает получение графиков переходных процессов, идентичных реальным сигналам в реальной системе при условии полного соответствия всех математических моделей своим прототипам – элементам реальной системы.

Наиболее часто встречаются в качестве элементов модели линейные динамические звенья, описываемые рациональными передаточными функциями от s .

2. ВЛИЯНИЕ ДАТЧИКОВ

Измерительные устройства или датчики оказывают решающее влияние на точность системы. Поэтому выбору датчиков следует уделять особое внимание.

Пример 4. Пусть требуется стабилизация температуры устройства за счет системы, использующей измеритель температуры на основе термометра сопротивления. Предположим, температура окружающей среды может изменяться от 20° до 30° . Предписанная температура равна 10° , допустимая погрешность не должна превышать $0,02^\circ$. Необходимо сформулировать требования к системе.

1. Решение задачи на основе только теории автоматического управления.

Разница между требуемой температурой и той температурой, которая установится вследствие температуры окружающей среды составляет от 10 до 20° . Следует ориентироваться на худший случай. Следовательно, берем 20° . Статический коэффициент усиления должен быть не менее отношения этой величины к допустимой ошибке, что дает $20 / 0,02 = 1000$ (то есть 60 дБ).

2. Учет области частот

Ожидания действия системы не быть «вечным», поэтому следует задать быстродействие системы. Даже если заказчик не указал области, следует из общих соображений задать этот параметр. Например, среднесуточная температура изменяется с известной скоростью. Если в помещении, где находится устройство, имеется дверь или окно, можно ожидать изменения температуры окружающей среды вследствие того, что окно или двери открываются, или закрываются. Приблизительно за 10 минут температура окружающей среды может измениться от максимального значения до минимального или наоборот. Исходя из этого, следует потребовать, как минимум, чтобы на частоте, соответствующей периоду 10 минут, коэффициент усиления был не менее, чем коэффициент, определенный в первом пункте. Это дает требование того, чтобы ЛАЧХ от минус бесконечности до $f_1 = 1/600$ Гц была выше значения 1000 , т.е. выше 60 дБ.

3. Учет нагрева всего устройства

Поскольку в системе будут протекать некоторые токи, в ней будет выделяться некоторое тепло. Если объект будет установлен на термоэлектрической батарее, то для его охлаждения потребуется протекание и через эту батарею. В термоэлектрической батарее одновременно действуют два эффекта, один – охлаждение или нагревание вследствие эффекта Пельтье, другой – нагревание вследствие выделения мощности на сопротивлении, через которое протекает ток. В зависимости от площади используемого радиатора второй эффект может оказывать более или менее существенное влияние. Можно утверждать, что не будет большой ошибки, если исходить из того, что при отключении системы обратной связи (но при работе всех электронных устройств) температура объекта может оказаться равной 60° или около того. Следовательно, возмущение следует оценить уже не как 20° , а как 50° . Тогда критическое значение коэффициента усиления должно быть равным не 1000, а 2500 (66,5 дБ).

4. Учет свойств датчика

Поскольку датчик непременно вносит ошибку в работу систему (будем называть ее погрешностью датчика), то следует, во-первых, предварительно распределить вклад в общую погрешность между двумя этими источниками, во-вторых, задать по-отдельности требования к датчику и требования к регулятору (или к замкнутому контуру системы). Разумным выбором будет потребовать нулевое значение статической ошибки, порождаемой значением статического усиления контура. Действительно, введение в регулятор интегратора делает (как правило) статический коэффициент контура бесконечным, отчего статическая ошибка становится равной нулевой. (Речь идет об ошибке за счет неидеальной работы контура, а не обо всей погрешности). Что касается динамической ошибки, то можно, например, распределить ее поровну между ошибкой за счет датчика и ошибкой за счет свойств контура. Тогда для надежности значение критического усиления поднимем еще вдвое, то есть получим значение 5000 (74 дБ). От датчика потребуем статической погрешности не более $0,02^{\circ}$ и динамической погрешности не более $0,01^{\circ}$ в интересующей нас области частот. Обсудим указанные параметры. Если, например, использовать самый распространенный термометр сопротивления (ММТ), этот элемент изменяет свое номинальное значение сопротивления приблизительно на 1 % на градус. Если же обратиться к такому параметру этого элемента, как его стабильность во времени, то выяснится, что за месяц работы этот элемент может изменить свое номинальное значение также на 1 %. Эта величина в 50 раз хуже, чем требуется. Требуемый датчик может быть изготовлен из медной проволоки, а лучше

– из платиновой, поскольку для меди указанная погрешность является наилучшей из возможных. Необходимо брать тонкую длинную проволоку, чтобы сопротивление было достаточным для измерения. Это сопротивление должно быть много большим, чем сопротивление соединительных проводов в схеме. Также в схеме обязательно возникнет эффект термопары в двух точках соединения платины с соединительными проводниками, что также может существенно ухудшить погрешность измерения. Иными словами, мы видим, что изготовление системы стабилизации температуры с указанными характеристиками является очень сложной задачей, для решения которой требуются обширные знания и опыт, учет многих факторов.

5. Фактический результат

Система стабилизации на самом деле будет стабилизировать только температуру датчика температуры. Сам объект, чью температуру следует стабилизировать, не является датчиком, он лишь находится близко к нему, его температура посредством тепловой связи влияет на температуру датчика, но не совпадает с ней, имеется градиент температуры в системе. Если объект окружен датчиками со всех сторон, и все они дают одинаковый результат измерения, то можно надеяться, что это и есть температура объекта. На практике в объекте происходят процессы, в том числе тепловые. Например, если объектом является полупроводниковый лазер, то в его активной области протекает ток накачки, где и порождается свечение. Остальная часть этого прибора более холодная, чем активная область, но именно стабилизация температуры этой активной области составляет задачу, которую необходимо решить.

3. ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ

Для борьбы с проблемой необходимо знать ее источник. Существуют проверенные методы их отыскания.

1. Исключительные изменения параметров (улучшение или ухудшение).

2. Синхронное детектирование (для выявления причинно-следственной связи).

3. Сравнение двух идентичных систем (с внесением тестовых изменений в одну из них или без таковых изменений).

Пример 5. Лазерная система, состоящая из электронной и оптической части, требует предварительного прогревания прежде, чем она выйдет в рабочий режим, то есть прежде, чем собственные девиации частоты войдут в зону допустимых отклонений от их «стартового» значения. Требуется локализовать причину для того, чтобы с ней бороться.

Прежде, чем обсуждать метод решения этой задачи, необходимы пояснения термина «отклонение».

Если имеется генератор некоторой частоты (по возможности наиболее точно формирующий

значение этой частоты), то точность (или качество) его работы следовало бы описывать такими показателями, как его статическая и динамическая ошибка. Предположим, фактическое значение, которое данный генератор должен формировать, равно 1 ГГц . Если на самом деле этот генератор формирует частоту, которая в среднем (при осреднении за очень большое время, например, за 100000 секунд) отклоняется от этого значения на 100 Гц в плюс, то это и будет его статическая ошибка. Можно говорить и о динамической ошибке. Например, можно дать такие характеристики, как максимальное отклонение от этого значения. Естественно, что если в среднем частота отклоняется на 100 Гц , то в отдельные моменты она может отклоняться существенно больше, например, на 300 Гц , как в плюс, так и в минус. Например, если частота на протяжении 2000 секунд будет отклоняться на 300 Гц в плюс, а потом на протяжении 1000 секунд будет отклоняться на 300 Гц в минус, то среднее отклонение как раз и будет плюс 100 Гц . Как видим, средняя погрешность – это величина, которая может оказаться намного меньше, чем максимальная погрешность. Если бы частота отклонялась поочередно в плюс и в минус на любую большую величину, но время пребывания в обоих этих состояниях было бы одинаковым, то средняя погрешность и вовсе была бы равной нулю. Поэтому малая средняя погрешность – это вовсе не такой «надежный» показатель «точности», как это кажется.

Ситуация еще хуже, чем вытекает из предыдущего рассуждения. На самом деле невозможно определить, насколько формируемая частота отклоняется от предписанного значения, поскольку других формирователей предписанного значения, более точных, чем лазерные стандарты частоты, в природе не имеется. Поэтому возникает задача о том, как узнать погрешность такого формирователя, который является лучшим из всех имеющихся. Эта задача – задача фундаментальной метрологии.

Мы не можем знать, насколько неточен лучший в мере эталон частоты. Единственный вариант его исследования – это сравнение его частоты с частотой такого же (идентичного) эталона. Если включить два одинаковых эталона частоты, каждый из них будет формировать сигнал со своим индивидуальным значением частоты. Каждое из них характеризуется какой-то погрешностью. Мы не можем знать значение этой погрешности. Поэтому мы можем лишь предполагать, что погрешность каждого из таких устройств приблизительно одинакова, поскольку устройства одинаковы. Мы можем предполагать, что эти погрешности независимы друг от друга. Эта гипотеза не выдерживает никакой критики, но иного не дано.

Скажем, если частота первого эталона на 100 Гц больше частоты второго эталона, то

возможно много вариантов того, как дела обстоят в действительности.

Оптимистическая гипотеза: можно предположить, что каждый из этих эталонов отклоняется в противоположную сторону. Можно надеяться, что истинное значение частоты находится посередине, первый эталон дает погрешность в плюс на 50 Гц , второй эталон дает погрешность в минус на 50 Гц . Такое предположение, очевидно, не верно.

Пессимистическая гипотеза: можно предположить, что оба эталона отклоняются в одну и ту же сторону, тогда получается, что погрешность одного эталона на 100 Гц больше, чем погрешность другого эталона. Кажется, что если эталоны идентичны, то нет никаких оснований считать, что один из них настолько хуже другого. Поэтому может показаться, что эта гипотеза также ошибочна.

Среднеквадратическая гипотеза: согласно математическим теориям о суммировании отклонений случайных независимых величин, их дисперсии складываются, а среднеквадратическое отклонение – это корень из дисперсии. Если так, то каждый эталон дает вклад, определяемый как квадратный корень из итогового вклада, то есть надо предположить, что погрешность каждого эталона составляет приблизительно $70,7\text{ Гц}$.

Все же наиболее верной является пессимистическая гипотеза. Действительно, хотя и имеется предположение, что эталоны идентичны, нельзя отбросить вероятность того, что отклонения каждого эталона от истинного значения имеют один и тот же знак. Действительно, эти эталоны находятся, как правило, в одинаковых температурных условиях, они питаются от одной и той же электрической сети, они находятся под действием одних и тех же магнитных полей Земли, одних и тех же гравитационных сил со стороны Солнца и Луны, и многих факторов, которыми приходится пренебрегать не вследствие их малости, а вследствие невозможности их учета. Одинаковое отклонение от требуемой величины может быть много большим, чем разница между формируемыми величинами, и поэтому даже идентичные генераторы (эталон частоты) могут характеризоваться одинаковой компонентой отклонения, которая гораздо больше, чем вариативная компонента.

Фактическое отклонение стандарта частоты от его идеального значения не изучается, поскольку нет возможности его изучения. Поэтому может быть изучено отклонение частот двух идентичных стандартов друг от друга и отклонение одного стандарта частоты от его стартового значения или от значения, принятого за стартовое.

Второй вариант невозможен, так как измерение частоты стандарта частоты – это сравнение его значения с чем-то иным, так что

мы приходим к единственно возможной схеме – изучение отклонения двух стандартов частоты друг от друга с течением времени. Схема исследований такова: включаются два одинаковых стандарта частоты (лазерных стабилизированных источников света), формируется сигнал разностной частоты (свет от двух источников направляется на общий фотоприемник, на выходе которого формируется сигнал разностной частоты), эта частота непрерывно измеряется во времени, и по графику этой разностной частоты делаются выводы о «точности» этого «эталона частоты».

Итак, если осуществлять такие измерения сразу же после включения всей системы, содержащий два эталона и одно устройство сравнения и регистрации, то окажется, что сначала разница довольно быстро изменяется во времени, затем она выходит на некоторый условно стабильный уровень, и далее изменяется относительно этого уровня уже не столь существенно.

Можно эти изменения разбить на два (по частотно-временным характеристикам): а) только средняя составляющая от этой разницы (сдвиг); б) только переменная составляющая от этой разницы (девиации). Если данные собирать с самого начала включения установки, средний сдвиг будет намного больше. То есть системы сначала выходят в режим, затем работают более успешно.

Выход в режим определен как необходимость прогрева всех элементов системы. Поскольку система содержит электронную и лазерную часть, естественно предположить, что лазерная часть как раз и требует прогрева, поскольку она более массивна и в ней циркулирует больше энергии.

На самом деле оказалось, что это далеко не так: прогрева требовала именно электронная часть. Вопрос состоит в том, как это было выяснено.

Ответ дала серия из двух экспериментов. В первом случае сначала была включена только лазерная часть, после ее прогрева была включена электронная часть, после чего сразу же была осуществлена регистрация разностной частоты. Во втором случае сначала была включена только электронная часть, после ее прогрева за такой же срок была включена лазерная часть и сразу же начата регистрация показаний. Оказалось, что во втором случае выход в режим произошел намного быстрее, чем в первом, то есть виновной в основной погрешности была именно электронная часть системы. После этого подобным методом пошаговой локализации был найден блок, ответственный за погрешность (также с использованием анализа всей схемы), и после улучшения электронной схемы системы необходимость длительного прогрева отпала.

Пример 6. Один из методов поиска неисправности в сложном изделии цифровой

техники состоит в том, чтобы последовательно улучшать условия работы для отдельных ее элементов. Это намного эффективнее, чем поочередно заменять одну микросхему на другую (так как это может потребовать замены всех микросхем, пока не отыщется неисправная) – такой метод формально очень прост, но он крайне затратный. Это также лучше, чем анализ всех сигналов в устройстве, потому что такой метод не требует затрат лишних микросхем, но он требует очень глубоких знаний, затрат большого ресурса времени, высокой квалификации и кропотливой работы настройщика радиоэлектронной аппаратуры. Известно, что многие цифровые микросхемы начинают хуже работать при прогреве (это не относится к микросхемам эмиттерно-связанной логики, с ними дело обстоит наоборот). Поэтому охлаждение неисправно работающей микросхемы может способствовать восстановлению ее параметров. Исследователь использует кисточку, смоченную в жидком азоте, и поочередно смачивает жидким азотом одну микросхему за другой. Поскольку жидкий азот быстро испаряется, охлаждение происходит кратковременно. В устройстве каждая из микросхем поочередно помещается в улучшенные условия работы. Если неисправная микросхема, которая была в устройстве единственной, в результате охлаждения начнет работать исправно, то все устройство в этот момент начнет работать исправно. Это позволит выявить неисправную микросхему, заменить ее и отремонтировать все устройство. Если в устройстве неисправных микросхем несколько, этот метод трудно будет применить.

Пример 7. Некоторые события могут совпасть во времени, из чего может быть сделан ошибочный вывод об их причинно-следственной связи. Для проверки этой гипотезы следует периодически изменять один из факторов, который гипотетически рассматривается как причина. Если следствие будет повторяться с тем же периодом, синхронно, это указывает на существование такой связи. Если же случайные изменения предполагаемого следствия не будут синхронными, то следует отклонить предположение об их причинно-следственной связи.

Пример 8. В предположении, что в системе следует улучшить один из параметров, следует сравнить эту систему с работой другой идентичной системы, в которой этот параметр не изменяется. Произведя однократное улучшение параметра, и зафиксировав однократное улучшение результата сравнения, можно сделать ошибочное заключение об эффективности этого улучшения. Для достоверности следует неоднократно осуществить улучшение, а затем ухудшение этого параметра. Если изменения результата

будут синхронны, следовательно, сделанное улучшение эффективно.

Пример 9. Если, например, предполагается, что в системе недостаточный коэффициент усиления, то улучшение одной из системы может проявиться в результате не существенно, так как другая система останется нестабильной. Вместо улучшения можно с целью исследования принудительно ухудшить этот же параметр, в данном случае – уменьшить усиление в системе. Если данный параметр имел критическое значение, то его уменьшение заметно скажется на результате, что будет легко выявлено. Следовательно, данный параметр следует не только вернуть в исходное положение, но и улучшить в еще большей степени.

Пример 10. Зачастую улучшение какого-либо параметра требует дорогостоящих вложений, тогда как ухудшение этого параметра ничего не стоит. В этом случае при исследованиях достаточно ухудшать поочередно каждый из подобных параметров, определить вклад этого ухудшения, из чего легко вычислить вклад соответствующего улучшения. Если улучшение обещает достаточный эффект, целесообразно его осуществить, если же эффект не ожидается, его можно не осуществлять на данном этапе. К таким параметрам, которые сложно улучшить, может быть отнесена, например, чувствительность фотоприемника, мощность излучения лазера, стабильность тока лазера, стабильность электропитания всей системы, качество оптических покрытий, эффективность использования света, и так далее. Вместо стабилизации электропитания можно, например, изменить его с использованием автотрансформатора, что позволит оценить вклад нестабильности питания. Вместо улучшения зеркал можно ввести нейтральный фильтр, который ослабит мощность света, что по эффекту эквивалентно ухудшению зеркал, и так далее.

4. ДЕЙСТВИЯ ПО УЛУЧШЕНИЮ СИСТЕМЫ

Последовательность действий при улучшении системы.

1. Следует аналитически выделить возможные источники недостаточной точности системы.

2. Путем последовательных экспериментов следует определить экспериментально вклад нестабильности каждого из таких параметров в погрешность всей системы.

3. Следует рассчитать вклад каждой нестабильности каждого параметра в общую погрешность как произведение величины этой нестабильности параметра на коэффициент его вклада.

4. Следует выявить наибольший вклад в общую погрешность и предельно его уменьшить путем снижения погрешности его стабилизации.

5. УХУДШЕНИЕ УСЛОВИЙ РАБОТЫ СИСТЕМЫ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вклад каждого фактора может быть определен как отношение приращения выходной величины к приращению этого фактора. Математически это означает частную производную по параметру.

Задачей стоит улучшение стабильности выходной величины Y . Факторы, ухудшающие эту стабильность, обозначим обобщенно Q_i , куда могут входить и шумы датчиков, и нестабильности отдельных элементов, и помеха, и так далее.

Для определения отношения приращения величины Y к приращению Q_i необходимо задать соответствующее приращение только этому параметру, не задавая его никакому другому параметру. Это технически может оказаться достаточно сложно. Кроме того, улучшить какой-либо параметр не только сложно, но и дорого.

Гораздо дешевле этот параметр временно ухудшить. Мы исходим из предположения, что частная производная слева равна частной производной справа, то есть функция частной производной выходной величины по интересующему нас параметру гладкая функция.

Для исключения влияния изменений других параметров следует использовать метод синхронного детектирования. А именно: если изменения параметра на заданную величину сопровождалось ухудшением стабильности выходной величины (однократно), это еще не доказывает причинно-следственной связи между этими событиями. Если же такой эксперимент производился многократно, и всякий раз такие изменения происходили синхронно и на одинаковую величину, можно обоснованно предположить о взаимосвязи этих изменений.

Пример 11. Пусть, например, стабильность электропитания составляет $\Delta U / U = 0,05$ (то есть 5%), стабильность мощности лазера составляет $\Delta P / P = 0,01$ (то есть 1%), погрешность стабилизации температуры эталона составляет $\Delta t = 0,1^\circ\text{C}$. Искусственно ухудшим стабильность питания на величину $\Delta U_1 / U = 0,05$ (то есть доведем ее до 10%), выявим ухудшение стабильности частоты системы до величины $\Delta f_1 = 0,5 \text{ Гц}$. Этою коэффициент приращения равен $K_1 = \Delta f_1 / \Delta U_1$. Вклад исходной нестабильности равен $\Delta F_1 = K_1 \Delta U = 0,5 \text{ Гц}$. Далее изменим температуру эталона на 1°C , зафиксируем вклад этого явления в изменения частоты на величину 2 Гц , что дает вклад фактической погрешности стабилизации равный $\Delta F_2 = K_2 \Delta t = 0,2 \text{ Гц}$.

Аналогично определим вклад нестабильности мощности лазера на уровне $\Delta F_3 = K_3 \Delta P = 0,1 \text{ Гц}$. Тогда расчетная погрешность равна квадратному корню из суммы квадратов этих величин, то есть

$$\Delta F = (0,25+0,04+0,01)^{1/2} = 0,548.$$

Если стабильность электропитания улучшить, например, в два раза, то получим

$$\Delta F = (0,0625+0,04+0,01)^{1/2} = 0,335.$$

Эффект почти 39 %. То есть такое улучшение эффективно. Если, например, вместо этого улучшить вдвое стабильность второго параметра, то получим

$$\Delta F = (0,25+0,01+0,01)^{1/2} = 0,52.$$

То есть эффект 5,1 %. Улучшение третьего параметра даст еще меньший эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная статья не решает всех вопросов проектирования САУ ВТ, а является лишь введением в проблему.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. А. Жмудь. Электронные системы управления лазерным излучением: специальные главы. Учебное пособие. Новосибирск. Издательство НГУ. 2010. 198 с.
- [2] Жмудь В.А. Применение ЦАП и АЦП в системах управления высшей точности. Автоматика и программная инженерия. 2013. 3(5). С. 68–79. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия). <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/7/aipi-4-2013-07.pdf>
- [3] Жмудь В. А. Моделирование и оптимизация систем управления лазерным излучением в среде VisSim: учеб. пособие / В. А. Жмудь; Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГУ, 2009. – 116 с.
- [4] В.А. Жмудь. Моделирование и численная оптимизация замкнутых систем автоматического управления в программе VisSim: учеб. пособие / В. А. Жмудь; Новосиб. гос. техн. ин-т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. – 124 с.



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук.
E-mail: oao_nips@bk.ru

Automatic Control System of Higher Accuracy

V.A. ZHMUD

Abstract: Systems of automatic control (ACS) operates on the principle of negative feedback. Feedback is based on measuring the output signal (state) of controlled object, comparing it to the specified (desired) value of this state, and use this difference (error) to form the control signal, applied to the object. Thus, the object output affects the input object that generates the control loop or closed loop. The difference between the highest precision ACS (HP ACS) is that in their design focuses on the problems of achieving high control accuracy. This paper gives the basic concepts, problems and methods of designing HP ACS.

Key words: Automation, control, error, mistake, accuracy stabilization

REFERENCES

- [1] V. A. Zhmud'. Jelektronnyye sistemy upravlenija lazernym izlucheniem: special'nye glavy. Uchebnoe posobie. Novosibirsk. Izdatel'stvo NGU. 2010. 198 s.
- [2] Zhmud' V.A. Primenenie CAP i ACP v sistemah upravlenija vysshej tochnosti. Avtomatika i programmnaja inzhenerija. 2013. 3(5). S. 68–79. FGBOU VPO NGTU (Novosibirsk, Rossija). <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/7/aipi-4-2013-07.pdf>
- [3] Zhmud' V. A. Modelirovanie i optimizacija sistem upravlenija lazernym izlucheniem v srede VisSim: ucheb. posobie / V. A. Zhmud'; Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGU, 2009. – 116 с.
- [4] V.A. Zhmud'. Modelirovanie i chislennaja optimizacija zamknytyh sistem avtomaticheskogo upravlenija v programme VisSim: ucheb. posobie / V. A. Zhmud'; Novosib. gos. tehn. in-t. – Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2012. – 124 с.

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.

Если по мнению редакционной коллегии к тексту статьи требуются примечания, редакционная коллегия вправе включать таковые, извещая предварительно об этом авторов. Авторы могут по своему усмотрению внести исправления в текст (устраняющие необходимость примечания), либо согласиться с примечанием, либо настаивать на опубликовании статьи без примечаний. В последнем случае редакционная коллегия вправе поместить статью в разделе

«Дискуссии».

ОТВЕТСТВЕННОСТЬ АВТОРОВ

Ответственность 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 научное рецензирование, редактирование и 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 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 А », или «Сила тока составляет несколько А ». Следует применять корректную запись, например, «Сила тока $I = 3 \text{ А}$ » или «Сила тока составляет несколько *Ампер*».

При написании формул используйте соответствующее программное обеспечение *Math (Microsoft Equation)*, встраиваемое в *Word*. Знаки препинания после уравнений, пожалуйста, пишите не в составе формул, а после формул как элементы текста.

В формулах использование курсива и прямого шрифта также имеет больше смысловое значение, а именно: для цифр и русских букв,

скобок, других служебных символов курсив не применяется. Курсив следует использовать для латинских букв, за исключением тех случаев, когда латинские буквы применяются для обозначения стандартных функций: \exp , \sin , \cos , \log , \lg , \ln , \mod , \max , \min и так далее – пишутся без курсива.

Мы просим авторов не использовать без необходимости *Math (Microsoft Equation)* для написания простейших формул в тексте абзаца, например, указание на значение какой-то из величин, или приведение простого соотношения, которое укладывается в половину строки и на которое не делается ссылок в дальнейшем.

Статьи, оформленные с существенными нарушениями требований к оформлению, могут быть отклонены от опубликования на этом основании.

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

I. Automation. Automated Systems	7
Department of Automation: Fifty Years of Success G.A. Frantsuzova, V.G. Trubin	9
On the Application of ADC Sigma-Delta Modulation in Switching Mode V.A. Zhmud	16
Guidelines for the Rapid Development of Microcontrollers Based on the Management of Digital Systems Layouts V.A. Zhmud, A. Yu. Ivoylov, V.G. Trubin	25
II. Robotics. Software and Systems. Telemechanics and Telemetry	32
Requirements to Virtual Environment Visualization Component in Simulation Systems N.M. Polevoy, A.M. Giatsintov	34
III. Innovative Technologies. Promising Technologies. Simulation of Systems. Numerical optimization	41
Influence of the Type of the Test Signals onto the Result of the Numerical Optimization of Controllers V. A. Zhmud, I. L. Reva, L. V. Dimitrov	43
Basis for the Use of Complex Form Signals in Numerical Optimization of Controllers for Closed-Loop Systems V. A. Zhmud, L. V. Dimitrov	54
New Approach to the Design of Robust Regulators V. A. Zhmud, I. L. Reva, L. V. Dimitrov	59
IV. Measuring Means and Systems. Identification	65
Development of the Control Program of a Chemical Reactor Using the Standard Controls N.A. Kulikov	67
System of Mobile Cardiac of Human Activity Monitoring: the Applicability of Different Filtering Methods for Electrocardiosignal D.N. Katasonov	76
Selection of the Best Two-Parameter Threshold Function in the Algorithms of Wavelet Filtering Yu.E. Voskoboinikov, D.A. Krisov	91
V. Popular Papers. Intriduction into Spesialities	99
Scientific School of Professor A.S. Vostrikov. On the Anniversary of the Founder G.A. Frantsuzova	101
Scientific School of Academician S.N. Bagaev. On the Anniversary of the Founder V.A. Zhmud	126
VI. Discussions. Forum. Information for Authors	126
Automatic Control System of Higher Accuracy V.A. Zhmud	128
Requirements for Publication in Scientific Electronic Journal "Automation and Software Engineering"	137

ISSN 2312-4997



9 772312 499001