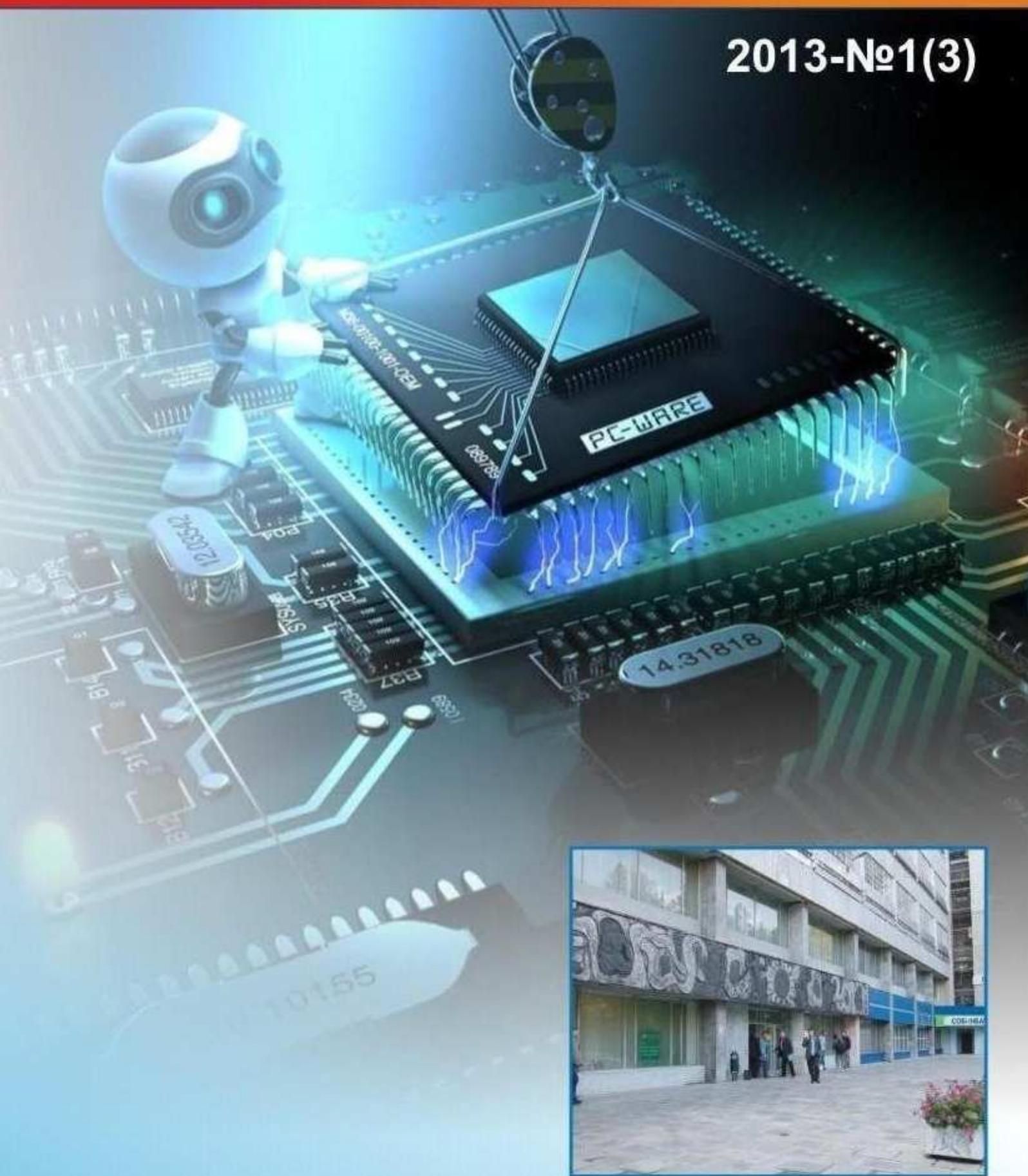




АВТОМАТИКА И ПРОГРАММНАЯ ИНЖЕНЕРИЯ

НОВОСИБИРСКИЙ ИНСТИТУТ
ПРОГРАММНЫХ СИСТЕМ

2013-№1(3)



Главный редактор д.т.н., доцент **В.А. Жмудь**,
ФГБОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» (НГТУ),
ОАО «Новосибирский институт программных систем» (НИПС), **Россия**

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

Редакционная коллегия:

- | | |
|---|--|
| Александр Валерьевич
Ляпидевский | Директор ОАО «Новосибирский институт программных систем» (ОАО «НИПС»), к.э.н., Россия |
| Анатолий Сергеевич
Востриков | Профессор кафедры Автоматики НГТУ, д.т.н.,
Заслуженный преподаватель РФ, академик МАН ВШ,
Россия |
| Владимир Иванович Гужов | Профессор кафедры Вычислительной техники
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 | Декан машиностроительного факультета Технического
университета Софии, доктор, профессор, Болгария |
| Ярослав Носек | 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 | Заведующий кафедрой автоматики 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., Россия |

- Василий Васильевич Губарев** Заведующий кафедрой Вычислительной техники НГТУ, профессор, д.т.н., Заслуженный деятель науки, Заслуженный работник высшей школы РФ, академик РАЕН, академик МАИ, **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, **Украина**
- 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**
- V. J. Savsani** Associate Professor at V. 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**
- 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**
- Владимир Иванович Гололобов** Руководитель лаборатории ОАО «НИПС», к.т.н., **Россия**
- Михаил Витальевич Калинин** Руководитель отдела ОАО «НИПС», **Россия**

УДК 681.2; 681.3; 681.5; 681.7

Учредитель журнала:

Открытое акционерное общество «Новосибирский институт программных систем»
Сайт организации: www.nips.ru

Адреса редакции:

630092, Россия, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20,
ФГБОУ ВПО НГТУ, Факультет Автоматики и вычислительной техники, зав. каф.
Автоматики

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

e-mail: oao_nips@bk.ru

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

Подписано в печать 22 апреля 2013 г.

Оглавление

I. Автоматика. Автоматизированные системы. Измерительные средства и системы.....	5
Оптоэлектронная система для контроля нефтесодержания в очищенной воде на основе элемента нарушенного полного внутреннего отражения.....	7
Определение значений фазовых сдвигов по интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии.....	10
Идентификация линейных динамических систем с использованием концепции сепараторов параметрического пространства.....	16
Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции.....	24
Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления.....	30
Программное обеспечение для лазерного измерителя деформаций земной коры.....	37
Пространственная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта.....	53
Оптоэлектронная измерительно-информационная система для обнаружения усилий плотин.....	61
II. Робототехника. Программные средства и системы.	
Свободное программное обеспечение. Открытое программное обеспечение.....	65
Согласование технических документов в информационных системах управления данными.....	67
Цифровой адаптивный регулятор для объектов управления третьего порядка.....	72
Программная система кластерного анализа данных смешанного типа.....	75
Реализация дистанционного управления по радиоканалу Bluetooth платформой, моделирующей работу роботизированных средств.....	82
Построение платформы моделирующей работу роботизированных средств на базе конструктора Lego Mindstorms NXT 2.0 в части управления электродвигателями.....	88
Интеллектуально-адаптивные методы обеспечения информационной сетевой безопасности.....	95
III. Инновационные технологии. Перспективные технологии.	
Моделирование систем.....	99
Разработка комплексной биотехнической системы наблюдения и коррекции параметров жизнедеятельности организма человека во сне при синдроме обструктивного апноэ и его последствиях.....	101
IV. Облачные технологии. Национальная программная платформа.....	107
Разработка и исследование адаптивных методов роевого интеллекта в задачах календарного планирования.....	109
V. Популярные статьи. Введение в специальность.....	115
Оптоэлектроника вчера, сегодня, завтра.....	117
Математическая модель распространения света в пространстве.....	121
VI. Дискуссии. Форум. К сведению авторов.....	129
Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия».....	131

**I. Автоматика.
Автоматизированные системы.
Измерительные средства и
системы**

Содержание раздела:

- Рахимов Н.Р., Ш.И. Мадумаров, Д.Д. Исломов, А.Н. Серьезнов. Оптоэлектронная система для контроля нефтесодержания в очищенной воде на основе элемента нарушенного полного внутреннего отражения. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 7–9. ФГБОУ ВПО СГГА и ФГБОУ ВПО НГТУ (Россия).
- Гужов В.И., Ильиных С.П., Кузнецов Р.А., Хайдуков Д.С. Определение значений фазовых сдвигов по интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 10–15. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Авдеенко Т.В. Идентификация линейных динамических систем с использованием концепции сепараторов параметрического пространства. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 16–23. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Жмудь В.А., Ядрышников О.Д. Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 24–29. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Жмудь В.А., Загорин А.Н. Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 30–36. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Терешкин Д.О. Программное обеспечение для лазерного измерителя деформаций земной коры. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 37–52. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Рабинович Е. В., Вайнмастер П. И., Новаковский Ю.Л. Пространственная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 53–60. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Рахимов Б.Н. Оптоэлектронная измерительно-информационная система для обнаружения усилий плотин. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 61–64. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).

Оптоэлектронная система для контроля нефтесодержания в очищенной воде на основе элемента нарушенного полного внутреннего отражения

Н.Р. Рахимов, Ш.И. Мадумаров, Д.Д. Исломов, А.Н. Серьезнов

НГТУ, СГГА (Россия)

Аннотация. Предлагается новая конструкция оптоэлектронной системы для контроля нефтесодержания в очищенной воде на основе элемента нарушенного полного внутреннего отражения. Отличительными особенностями которого является то, что кювета выполнена в виде прозрачного цилиндра, внутри него имеется полость в виде призмы, проходящей через его центр, а также переключатель оптических пар, при этом нефтесодержащих сред контролируется $n + 1$ оптронами открытого канала.

Ключевые слова: Светоизлучающий диод, кювета, элемент нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), оптоэлектронная система.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все шире применяют автоматические экспресс-анализаторы, построенные на физических методах контроля нефтесодержания в очищенной воде. Экспресс-анализаторы – это приборы, которые обеспечивают контроль нефтесодержания в очищенной воде, а также обеспечивают работу аварийной сигнализации в случае превышения установленного контрольного значения. Принцип работы экспресс-анализатора следующий. В трубопровод, по которому протекает анализируемая вода, врезается штуцер, по которому часть воды направляется в сигнализатор. Эта вода проходит через специальную кювету прибора, в которой оптический датчик фиксирует содержание нефтепродуктов. В случае превышения установленного значения (например, 15 мг/л), прибор выдает сигнал, от которого могут быть задействованы аварийная сигнализация или специальные электромагнитные клапаны, управляющие всем потоком воды.

Среди количественных методов определения нефтесодержания в очищенной воде наиболее распространены диэлькометрические и оптические (ИК-спектроскопия, нефелометрия,

фотоколориметрия) [2]. Преимуществом оптического метода является то, что на его базе, в основном, созданы автоматические проточные анализаторы нефтесодержания в очищенной воде [3–6].

Сигнализаторы нефти типа «OMD» производства фирмы «DECKMA» (Гамбург, Германия) разработаны специально для применения совместно с сепараторами льяльных вод. Их технические данные и принцип работы соответствуют международным требованиям, изложенным в соответствующих нормативных документах. На рис. 1 сигнализатор «OMD-21» (а) и установка на технологический процесс (б).



а)



б)

Рис. 1. Сигнализатор «OMD-21» (а) и установка на технологический процесс (б) [9]

Фирма «Deckma» выпускает несколько типов сигнализаторов, используемых при оснащении судовых и береговых очистных установок.

С 2005 года фирма «Deckma» начала производить сигнализаторы типа «OMD-2005» (рис. 2), выполняющие требования Резолюции МЕРС.107(49). В соответствии с требованиями данной Резолюции, прибор дополнен запоминающим устройством с памятью на 18 месяцев работы. Остальные функции аналогичны тем, которые применяются на модели «OMD-21». Заводская тарировка приборов позволяет контролировать нефтесодержание в пределах 15 мг/л. Установка других значений, например 8 или 5 мг/л легко производится кнопками, расположенными на передней панели прибора. Данные приборы применяются для контроля работы установок «ОНВ-МБ», а также установок «ОНВ», смонтированных на судах внутреннего плавания.



Рис. 2. Сигнализатор «OMD-2005» [9]

Простота и надежность данных приборов послужила основанием для их применения в промышленности. Например, в Санкт-Петербурге на предприятии по изготовлению пластмассовых изделий применили «OMD-21» для контроля гидравлической системы прессов. По существующей технологии не допускается попадание нефтепродуктов в охлаждающую воду. В противном случае процесс приходится прекращать, промывать все механизмы и соответственно нести большие финансовые потери. Использование «OMD-21» устранило эту опасность.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Нисколько не уступая другим физико-химическим методам в точности и удобстве определения нефтесодержания в очищенной воде, метод нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО) превосходит их в экспрессности, обеспечивая в то же время неразрушающий контроль. В основе метода НПВО лежит явление проникновения световой

волны в оптически менее плотную среду n_2 , когда световой поток $\Phi_{0\lambda_1}$ распространяется из оптически более плотной среды n_1 в менее плотную n_2 под углом Θ .

Физический смысл заключается в следующем. Используются два световых потока с разными длинами волн, например, $\lambda_1 = 4,63$ мкм (измерительный) и $\lambda_2 = 1,7$ мкм (опорный), соответствующим максимальному и минимальному поглощению нефтесодержащих сред. Световой поток $\Phi_{0\lambda}$ распространяется из оптически плотной среды с показателем преломления n_1 , в менее плотную с n_2 под углом Θ , превышающим предельный (критический) угол полного внутреннего отражения Θ_k . Световой поток $\Phi_{0\lambda_1}$ частично проникает в среду n_2 ; на глубину порядка длины волны падающего излучения [7]:

$$d_p = \frac{\lambda_1}{2\pi(\sin^2 \Theta - n_{21})^{1/2}}$$

где λ_1 – длина волны излучения в оптически плотной среде с показателем преломления n_1 ; $n_{21} = n_2/n_1$ – относительный показатель преломления. Если угол излучения равен или превышает критический $\Theta_k = \arcsin n_1/n_2$, то наблюдается полное внутреннее отражение (метод ПВО). Поскольку менее плотная среда с комплексным показателем преломления $\tilde{n} = n_2 - j\chi_2$: обладает поглощением, отражение не будет полным, т. е. условия для этого нарушаются и коэффициент отражения ($R = \Phi_{\lambda_1} / \Phi_{0\lambda_1}$) станет меньше единицы. Степень ослабления R пропорциональна показателю поглощения. Таким образом, чем выше поглощение, тем сильнее нарушается отражение. Это называется эффект НПВО.

В ИК-области спектра для достижения условия $n_1 > n_2$ используются измерительные элементы НПВО из высокопреломляющих оптических материалов, прозрачных в соответствующем диапазоне.

Предлагаемая авторами оптоэлектронная система [8] для определения содержания эмульсионной воды в нефти и нефтепродуктах показана на рис. 3. Устройство содержит цилиндр 1 с полостью в виде призмы 2, проходящей через его центр, задающий генератор (источник импульсного питания) 17, триггер 18 со счетным входом (счетчик), светоизлучающие диоды (СИД) 3–8 и компенсационный СИД 15, измерительные 9–14 и компенсационный 16 приемники оптического излучения (ПОИ), сумматор 19, блок обработки фотоэлектрического сигнала 20 и регистрирующий прибор или ЭВМ 21.

Система работает следующим образом. При включении задающего генератора 17 вырабатываемые им прямоугольные импульсы с частотой 8...10 кГц подаются на вход триггера 18. Разделенные импульсы поступают на СИД 3–8

измерительных каналов и СИД 15 опорного канала. Поток излучения светоизлучающих диодов фокусируется на измерительных поверхностях и подается на фотоприемники 9–14. Далее сигналы с фотоприемников суммируются в сумматоре 19. Излучение компенсационного светоизлучающего диода через световод попадает на компенсационный фотоприемник 16. Затем сигнал с компенсационного фотоприемника поступает в блок обработки фотоэлектрического сигнала 20, где измеряется отношение компенсационного и измерительного сигналов. Сигнал отношения, несущий информацию о содержании нефти в среде, подается на регистрирующий прибор или ЭВМ 21, по показанию которого судят о нефтесодержании в очищенной воде.

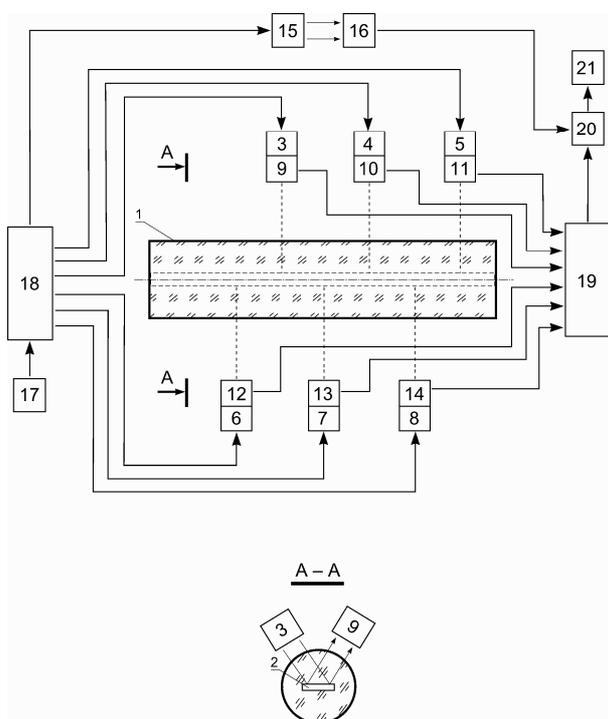


Рис. 3. Блок-схема оптоэлектронной системы для определения нефтесодержания в очищенной воде

Недостатком известных датчиков является наличие погрешностей, обусловленных неравномерностью распределения нефтесодержащих сред в объеме очищенной воды. Предлагаемое устройство повышает точность за счет многократного объемного измерения, суммирования и осреднения фотоэлектрического сигнала. Кроме этого, с его помощью можно определить содержание нефтепродуктов в эмульсионной воде.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки по проекту «Исследование предельных точностей оптических методов измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка

новых робототехнических и электромеханических систем», Темплан, проект № 7.559.2011, НИР № 01201255056.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Левченко Д.Н., Бергштейн А. и др. Эмульсии нефти с водой и методы их разрушения / Химия, 1967. – С. 14.
- [2] Абдуллаев А.А. и др. Контроль в процессах транспорта и хранения нефтепродуктов / М.: Недра, 1990 г. – С. 194–195.
- [3] Рахимов Н.Р., Парфирьев Л.Ф. Оптоэлектронные системы на основе эффекта НПВО для контроля технологических параметров нефти и нефтепродуктов / Изв. вузов. Приборостроение, 2006. № 1. – С. 41–45
- [4] Мирзамахмудов Т.М., Рахимов Н.Р., Гафуров У.А., Зокиров Р.З., Атакулов О.Х.. Устройство для определения оптических параметров жидких сред / Авторское свидетельство № 1693482 от 23.11.91 г.
- [5] Рахимов Н.Р. Оптический контроль в нефтеперерабатывающем производстве / Монография. – Фергана: Техника, 2004. – 91 с.
- [6] Харрик Н. Дж. Спектроскопия внутреннего отражения / М.: Мир, 1970. – 305 с.
- [7] Патент РУз IAP 20030713 от 17.09.2004 г. Устройство для определения содержания эмульсионной воды в нефти и нефтепродуктах / Ш.М. Сайдахмедов; Р.Ж. Тожиев; Н.Р. Рахимов; А.Х. Хайдаров // Б.И. 2005. № 8. – С. 141.
- [8] Заявка № 2011153209 Российская федерация. Оптоэлектронный многопараметровый колориметр / Б.Н. Рахимов и др.; Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Сибирская государственная геодезическая академия».
- [9] Интернет-ресурс: <http://www.ecos.su>

Abstract. To suggest new design optoelectronic multifunctional test-systems on the base of semi conductive optron of an open channel have been constructed and worked out for the first time. Which distinctive features is that a ditch is made in the form of a transparent sphere, in side has a cavity in a form cylinder, and at the centre cylinder installed the cylindrical or prismatic silver reflecting surface, and also the switch of optical pairs. In the each parameter is supervised by four radians and detectors the open channel.

Keywords: emitting diodes, emitting receiver (OER), destructed full inner reflection (DFIR), optoelectronic systems.

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

Шерзод Ильхомович Мадумаров – аспирант НГТУ кафедры Автоматики. E-mail: fergana_10@mail.ru

Донер Дилмуродович Исломов – магистрант ФГБОУ ВПО «СГГА». E-mail: n_rah@ngs.ru

Серьезнов Алексей Николаевич – профессор кафедры самолето- и вертолетостроения ФГБОУ ВПО НГТУ, д.т.н.

Определение значений фазовых сдвигов по интерференционным картинам в фазосдвигающей интерферометрии

В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Кузнецов Р.А., Хайдуков Д.С.
НГТУ (Новосибирск, Россия)

Аннотация: В статье рассматривается алгоритм явного определения фазовых сдвигов из серии интерференционных картин, полученных методом пошагового фазового сдвига, решением системы трансцендентных уравнений.

Ключевые слова Метод фазовых шагов, интерферограмма, уравнения расшифровки.

I. ВВЕДЕНИЕ

Наибольшее применение при построении интерференционных систем в последние годы получили методы получения и расшифровки интерферограмм на основе пошагового сдвига (пошаговая или фазо-сдвигающая интерферометрия, *phase-sampling, phase-shifting interferometry*) [1–12]. Метод пошагового фазового сдвига основан на регистрации нескольких интерференционных картин при изменении фазы опорной волны δ_i на некоторые известные значения.

$$I_i(x, y) = I_0(x, y) \{1 + V(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta_i]\}, \quad (1)$$

где $i=0, 2, \dots, m-1$, m - число фазовых сдвигов.

На *рис. 1* показана принципиальная схема оптической установки, в которой фазовый сдвиг задается перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.

Основной задачей расшифровки является определение разности фаз интерферирующих волновых фронтов $\phi(x, y)$ по значениям зарегистрированных интенсивностей $I_i(x, y)$. Если фазовый сдвиг известен, то в уравнении три неизвестных: $\phi(x, y)$ - фазовая разность, $I_0(x, y)$ - средняя интенсивность, $V(x, y)$ - видность. Для их нахождения нам необходимо не менее трех уравнений с различными значениями δ_i .

Решая системы уравнений можно найти все три искомые величины. Формулы для расшифровки выводятся как решение системы тригонометрических уравнений вида (1). Известно большое число выражений для расшифровки с различным числом фазовых сдвигов. Первые известные алгоритмы использовали формулы расшифровки с тремя или четырьмя сдвигами. С возрастанием вычислительной мощности современных компьютеров появилась возможность использовать

алгоритмы с большим числом сдвигов. Так в работе [3] представлен алгоритм, использующий 15 фазовых сдвигов, а в работе [6] - 101 фазовый сдвиг.

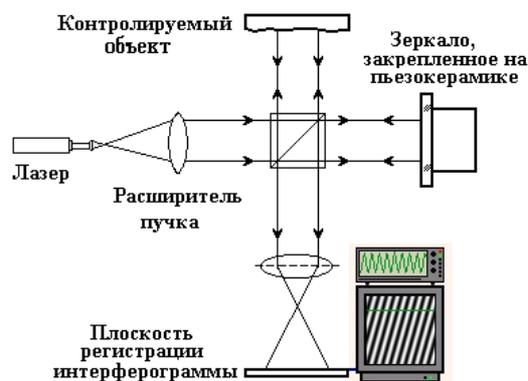


Рис.1. Схема интерферометра Тваймана-Грина с перемещением зеркала, закрепленного на пьезокерамике.

II. УРАВНЕНИЯ РАСШИФРОВКИ

Нами предложен [10, 11] обобщенный алгоритм расшифровки, позволяющий установить структуру известных алгоритмов и конструировать новые алгоритмы с неограниченным количеством фазовых сдвигов.

$$\phi = \arctan\left(-\frac{Y^\perp \cdot S}{Y^\perp \cdot C}\right). \quad (2)$$

В этом выражении $C = (\cos \delta_0, K, \cos \delta_{m-1})^T$, $S = (\sin \delta_0, K, \sin \delta_{m-1})^T$, δ_i - фазовые сдвиги, размерность векторов определяется m - числом фазовых сдвигов. Y^\perp - вектор, ортогональный вектору $Y = (I_0, K, I_{m-1})^T$, где $I_i(x, y)$ - набор измеренных интенсивностей с различными фазовыми сдвигами δ_i .

Существует ряд систематических ошибок, которые влияют на правильность определения разности фаз. Это - ошибки при определении интенсивности и ошибки при установлении фазового сдвига. В [13, 14] показано, что основной вклад в погрешность вносят ошибки

при установке фазового сдвига.

Целью данной работы является явное определение действительной величины вносимых фазовых сдвигов путем анализа траектории интерференционных сигналов в двух произвольных точках интерферограммы. В этом случае не требуется априорного знания величины сдвига.

III. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ

Уравнение (1) можно представить в виде:

$$I_i(x, y) = A(x, y) \{1 + B(x, y) \cos[\phi(x, y) + \delta_i]\}, \quad (3)$$

где $A(x, y)$ - средняя яркость, $B(x, y)$ - амплитуда интерференционных полос, $\phi(x, y)$ - фазовая разность, δ_i - фазовые сдвиги.

Можно сделать допущение, что в различных точках фазовые сдвиги одинаковы. Это предположение выполняется в большинстве случаев, исходя из физических условий проведения эксперимента. Тогда мы можем получить добавочные уравнения, рассматривая решения не в одной, а в нескольких пространственных точках (x_k, y_k) .

$$I_{ik}(x, y) = A_k(x, y) \{1 + B_k(x, y) \cos[\phi_k(x, y) + \delta_i]\}$$

или

$$I_{ik} = A_k [1 + B_k \cos(\phi_k + \delta_i)]. \quad (4)$$

Если мы берем m фазовых сдвигов, то общее число неизвестных в 2 точках будет: $2 \cdot 3 + m - 1$. ($I_{0,1}, I_{0,2}, B_1, B_2, \phi_1, \phi_2, \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4$) (рис.2). Считаем, что $\delta_0 = 0$. Если взять 5 сдвигов, то в 2

точках получится 10 уравнений и 10 неизвестных. Этого достаточно, чтобы точно определить все неизвестные, включая фазовые сдвиги.

В общем случае, число точек $k=1, \dots, n$. Общее число неизвестных: $n \cdot 3 + m - 1$. Число уравнений: $n \cdot (m - 1)$. Решение можно найти, если общее число уравнений больше или равно числу неизвестных, т.е.:

$$n \cdot m \geq 3n + (m - 1) \quad (5)$$

В общем случае, число точек $k=1, \dots, n$. Общее число неизвестных: $n \cdot 3 + m - 1$. Число уравнений: $n \cdot (m - 1)$. Решение можно найти, если общее число уравнений больше или равно числу неизвестных, т.е.:

$$n \cdot m \geq 3n + (m - 1) \quad (5)$$

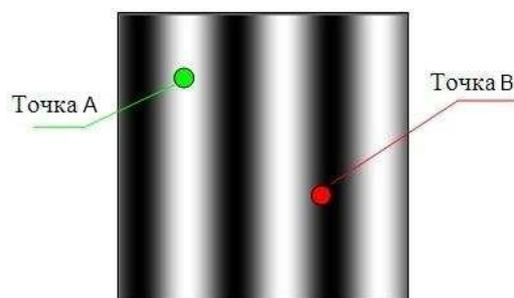


Рис. 2 Две произвольные точки на интерферограмме

Если взять две точки на интерферограмме с координатами $A(x_A, y_A)$ и $B(x_B, y_B)$ при пяти фазовых сдвигах, получим систему из десяти уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A)) \\ I_2(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \delta_1) \\ I_3(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \delta_2) \\ I_4(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \delta_3) \\ I_5(x_A, y_A) = A(x_A, y_A) + B(x_A, y_A) \cos(\phi(x_A, y_A) + \delta_4) \\ I_6(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B)) \\ I_7(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \delta_1) \\ I_8(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \delta_2) \\ I_9(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \delta_3) \\ I_{10}(x_B, y_B) = A(x_B, y_B) + B(x_B, y_B) \cos(\phi(x_B, y_B) + \delta_4) \end{array} \right. \quad (6)$$

Переобозначим интенсивности $I_1 \dots I_5$ как $x_1 \dots x_5$, интенсивности $I_6 \dots I_{10}$ как $y_1 \dots y_5$, а уровни средней яркости $A(x_A, y_A)$ и

$A(x_B, y_B)$ - x_0 и y_0 . соответственно. С учетом принятых обозначений система уравнений (6) примет вид

$$\begin{cases} x_1 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1) & y_1 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2) \\ x_2 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \delta_1) & y_2 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \delta_1) \\ x_4 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \delta_3) & y_3 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \delta_2) \\ x_3 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \delta_2) & y_4 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \delta_3) \\ x_5 = x_0 + B_1 \cos(\phi_1 + \delta_4) & y_5 = y_0 + B_2 \cos(\phi_2 + \delta_4) \end{cases} \quad (7)$$

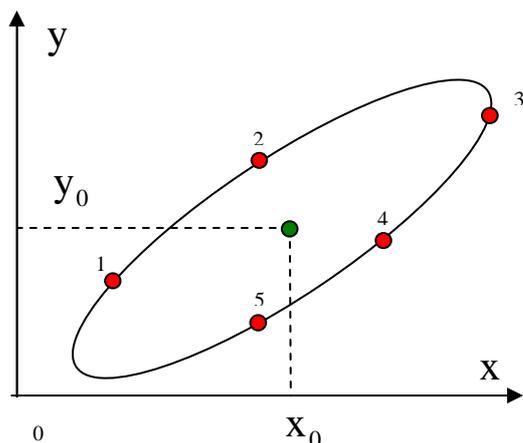


Рис 3. Точки интенсивностей

В уравнении (7) (x, y) – координаты 5 точек. Изобразим эти точки на плоскости x - y (рис. 3). Положение точек на плоскости зависит от параметров, определяемых уравнениями (6). Если менять фазовые сдвиги δ_i непрерывно, то точка на плоскости опишет эллиптическую траекторию, то есть, любая точка, соответствующая системе уравнений (6), принадлежит некоторому эллипсу.

Получим уравнение эллипса, используя свойства пучка кривых.

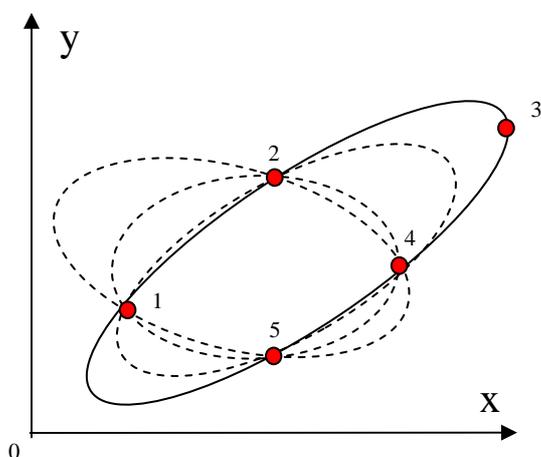


Рис 4. Пучок кривых второго порядка

Через четыре точки можно провести бесконечное количество кривых второго порядка (эллипсов) (рис.4).

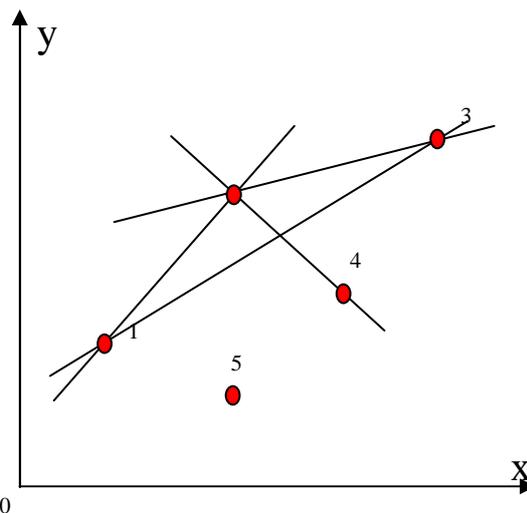


Рис. 5. Порядок соединения точек пучка кривых

Уравнение пучка кривых второго порядка имеет вид

$$f_{12}(x, y) \cdot f_{23}(x, y) + \alpha \cdot f_{13}(x, y) \cdot f_{24}(x, y) = 0, \quad (8)$$

где $f_{KN}(x, y)$ - уравнение прямой, проходящей через точки K и N соответственно, а α - коэффициент, позволяющий выбрать определенную кривую в пучке. На рис. 5 показаны прямые, используемые для нахождения уравнения эллипса из пучка кривых.

Уравнение прямой общего вида можно записать как

$$f_{KN}(x, y) = Ax + By + C = 0. \quad (9)$$

Поскольку прямая задана двумя точками на плоскости, то коэффициенты уравнения (9) путем несложных преобразований могут быть получены из канонического уравнения прямой

$$\frac{x - x_K}{x_N - x_K} = \frac{y - y_K}{y_N - y_K}, \quad (10a)$$

$$\frac{(x - x_K)(y_N - y_K) - (y - y_K)(x_N - x_K)}{(x_N - x_K)(y_N - y_K)} = 0, \quad (10b)$$

$$\begin{aligned} A &= y_N - y_K \\ B &= -(x_N - x_K) \end{aligned} \quad (10c)$$

$$C = -x_K A - x_N B$$

Для прямых, показанных на рис. 5, имеем

четыре уравнения

$$\begin{cases} f_{12}(x, y) = A_1x + B_1y + C_1 = 0 \\ f_{23}(x, y) = A_2x + B_2y + C_2 = 0 \\ f_{13}(x, y) = A_3x + B_3y + C_3 = 0 \\ f_{24}(x, y) = A_4x + B_4y + C_4 = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Выберем коэффициент α таким образом, чтобы выбранная из пучка кривая проходила и через пятую точку (рис. 4 – сплошная кривая). Для этого необходимо решить следующее уравнение

$$f_{12}(x_5, y_5) \cdot f_{23}(x_5, y_5) + \alpha \cdot f_{13}(x_5, y_5) \cdot f_{24}(x_5, y_5) = 0. \quad (12)$$

Решение данного уравнения имеет вид

$$\alpha = - \frac{(A_1x_5 + B_1y_5 + C_1)}{(A_3x_5 + B_3y_5 + C_3)} \times \frac{(A_2x_5 + B_2y_5 + C_2)}{(A_4x_5 + B_4y_5 + C_4)}. \quad (13)$$

Уравнение эллипса в общем виде

$$a_{11}x^2 + 2a_{12}xy + a_{22}y^2 + 2a_{13}x + 2a_{23}y + a_{33} = 0. \quad (14)$$

Коэффициенты уравнения (14) находим, раскрывая уравнение (12) и приводя подобные члены

$$\begin{cases} a_{11} = A_1A_2 + \alpha A_3A_4 \\ a_{12} = \frac{1}{2}[A_1B_2 + A_2B_1 + \alpha(A_3B_4 + A_4B_3)] \\ a_{22} = B_1B_2 + \alpha B_3B_4 \\ a_{13} = \frac{1}{2}[A_1C_2 + A_2C_1 + \alpha(A_3C_4 + A_4C_3)] \\ a_{23} = \frac{1}{2}[B_1C_2 + B_2C_1 + \alpha(B_3C_4 + B_4C_3)] \\ a_{33} = C_1C_2 + \alpha C_3C_4 \end{cases} \quad (15)$$

Теперь можно сократить число неизвестных в системе уравнений (7), приведя центр эллипса в начало координат. Координаты центра эллипса x_0 и y_0 находим, решая систему уравнений

$$\begin{cases} a_{11}x_0 + a_{12}y_0 = -a_{13} \\ a_{21}x_0 + a_{22}y_0 = -a_{23} \end{cases}, \quad (16)$$

$$x_0 = - \frac{\begin{vmatrix} a_{13} & a_{12} \\ a_{23} & a_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}, \quad y_0 = - \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{13} \\ a_{12} & a_{23} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix}}. \quad (17)$$

После исключения переменных x_0 и y_0 система уравнений (7) примет вид

$$\begin{cases} x_1 = B_1 \cos(\phi_1) & y_1 = B_2 \cos(\phi_2) \\ x_2 = B_1 \cos(\phi_1 + \delta_1) & y_2 = B_2 \cos(\phi_2 + \delta_1) \\ x_4 = B_1 \cos(\phi_1 + \delta_3) & y_3 = B_2 \cos(\phi_2 + \delta_2) \\ x_3 = B_1 \cos(\phi_1 + \delta_2) & y_4 = B_2 \cos(\phi_2 + \delta_3) \\ x_5 = B_1 \cos(\phi_1 + \delta_4) & y_5 = B_2 \cos(\phi_2 + \delta_4) \end{cases} \quad (18)$$

Выразим синус первого фазового угла через значения интенсивностей с различными фазовыми сдвигами

$$x_2 = B_1 \cos(\phi_1 + \delta_1) = B_1 \cos(\phi_1) \cos(\delta_1) - B_1 \sin(\phi_1) \sin(\delta_1), \quad (19a)$$

$$x_3 = B_1 \cos(\phi_1 + \delta_2) = B_1 \cos(\phi_1) \cos(\delta_2) - B_1 \sin(\phi_1) \sin(\delta_2). \quad (19b)$$

$$B_1 \sin(\phi_1) = \frac{x_2 - x_1 \cos(\delta_1)}{\sin(\delta_1)} \quad (20)$$

$$B_1 \sin(\phi_1) = \frac{x_3 - x_1 \cos(\delta_2)}{\sin(\delta_2)}$$

И, вычитая их друг из друга, получим

$$x_1 \sin(\delta_1 - \delta_2) + x_2 \sin(\delta_1) - x_3 \sin(\delta_2) = 0, \quad (21)$$

В векторном виде

$$\begin{cases} x_1 \begin{pmatrix} \sin(\delta_1 - \delta_2) \\ \sin(\delta_2) \\ -\sin(\delta_1) \end{pmatrix} \\ y_1 \begin{pmatrix} \sin(\delta_1 - \delta_2) \\ \sin(\delta_2) \\ -\sin(\delta_1) \end{pmatrix} \end{cases} = 0. \quad (22)$$

Исключаем из выражения (22) член $\sin(\delta_1 - \delta_2)$

$$\left(\frac{x_2}{x_1} - \frac{y_2}{y_1} \right) \sin(\delta_2) - \left(\frac{x_3}{x_1} - \frac{y_3}{y_1} \right) \sin(\delta_1) = 0, \quad (23)$$

В результате получим

$$s_{21} = \frac{\sin(\delta_2)}{\sin(\delta_1)} = \frac{x_1y_3 - x_3y_1}{x_1y_2 - x_2y_1}, \quad (24a)$$

Аналогично можно получить

$$s_{31} = \frac{x_1y_4 - x_4y_1}{x_1y_2 - x_2y_1}, \quad (24b)$$

$$s_{41} = \frac{x_1y_5 - x_5y_1}{x_1y_2 - x_2y_1}. \quad (24c)$$

Из (18) следует

$$\sin(\delta_1 - \delta_2) B_1 \sin(\phi_1) +$$

$$+x_1 \cos(\delta_2) - x_3 \cos(\delta_1) = 0, \quad (24)$$

$$\sin(\delta_1 - \delta_2) B_2 \sin(\phi_2) + \\ +y_1 \cos(\delta_2) - y_3 \cos(\delta_1) = 0. \quad (25)$$

Из выражений (24), (25) найдем соотношение первого и второго косинусов углов фазовых сдвигов

$$\sin(\delta_1 - \delta_2) \frac{x_2 - x_1 \cos(\delta_1)}{\sin(\delta_1)} + \\ +x_1 \cos(\delta_2) - x_3 \cos(\delta_1) = 0. \quad (26)$$

Раскрывая выражение (26), получим

$$\cos(\delta_1) s_{21} - \cos(\delta_2) - s_{21} \frac{x_2}{x_1} + \frac{x_3}{x_1} = 0, \quad (27)$$

$$\cos(\delta_1) s_{21} - \cos(\delta_2) + b_1 = 0, \quad (28)$$

где $b_1 = s_{21} \frac{x_2}{x_1} - \frac{x_3}{x_1}$.

Если ввести обозначения для $\sin(\delta_1)$ сдвигов как s_i и $\cos(\delta_1)$ как c_i , то выражение (28) можно переписать в виде

$$c_1 s_{21} - c_2 + b_1 = 0 \quad (29)$$

С другой стороны, выражая синус через косинус, получим

$$s_{21} = \frac{s_2}{s_1} = \frac{\pm \sqrt{1 - c_2^2}}{\pm \sqrt{1 - c_1^2}}, \quad (29a)$$

Возводя в квадрат выражение (29a) и приравнявая правую и левую части, получим

$$\frac{1 - c_2^2}{1 - c_1^2} - s_{21}^2 = 0$$

или

$$c_1^2 s_{21}^2 - c_2^2 - s_{21}^2 + 1 = 0. \quad (30)$$

Из полученного выражения (30) и уравнения (29) получаем систему уравнений для нахождения косинусов углов сдвига

$$\begin{cases} s_{21} c_1 - c_2 + b_1 = 0 \\ s_{21}^2 c_1^2 - c_2^2 - s_{21}^2 + 1 = 0 \end{cases} \quad (31)$$

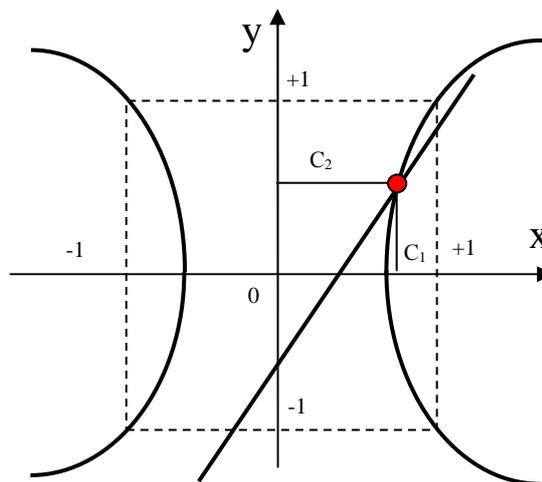


Рис. 6. Решение системы уравнений (31)

Решаем систему уравнений (31), выражая косинус второго угла фазового сдвига из первого уравнения системы $c_1 = \frac{c_2 + b_1}{s_{21}}$ и подставляя его во второе уравнение, получим

$$(c_2 + b_1)^2 - (c_2^2 + s_{21}^2) + 1 = 0. \quad (32)$$

Графически решение системы уравнений (31) может быть представлено как пересечение гиперболы $s_{21}^2 c_1^2 - c_2^2 - s_{21}^2 + 1 = 0$ с прямой $s_{21} c_1 - c_2 + b_1 = 0$ (Рис.6).

Штриховой линией показана область допустимых решений $|c_1| \leq 1$ и $|c_2| \leq 1$. Уравнение имеет единственное решение, удовлетворяющее данному условию

$$c_1 = \frac{c_2 + b_1}{s_{21}}, \quad c_2 = \frac{s_{21}^2 - b_1 - 1}{2b_1} \quad (33)$$

Аналогично можно найти косинусы остальных углов фазовых сдвигов.

Синусы углов фазовых сдвигов находим следующим образом:

- Выражаем синус первого угла фазового сдвига через значение его косинуса $s_1 = \pm \sqrt{1 - c_1^2}$. Знак перед корнем выбирается равным знаку выражения $x_1 y_2 - x_2 y_1$.

- Остальные значения синусов углов фазовых сдвигов для согласования их знаков находим, подставляя найденное значение первого угла фазового сдвига в ранее найденные отношения синусов

$$s_2 = s_{21} s_1; \quad s_3 = s_{31} s_1; \quad s_4 = s_{41} s_1. \quad (34)$$

Определив значения фазовых сдвигов, можно определить исходные фазовые разности используя уравнение расшифровки (2).

IV. ВЫВОДЫ

В статье описан алгоритм расшифровки интерференционных картин, основанный на определении действительных значений фазового сдвига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки по проекту «Исследование предельных точностей оптических методов измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка новых робототехнических и электромеханических систем», Темплан, проект № 7.559.2011, НИР № 01201255056.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Hariharan P., Oreb V.F., Brown N. Digital phase-measurement system for real-time holographic interferometry // Optics Communication.- Vol.41.- №6.-1982.- pp.393-398

[2] Wyant J.C., Creath K. Recent advances in interferometric optical testing // Laser Focus.- 1985. - pp.118-132.

[3] Wyant J.C. Interferometric optical metrology: basic system and principles // Laser Focus.- 1982.- pp.65-67.

[4] Creath K. Phase-shifting speckle interferometry // Applied Optics. 1985. V.24. P.3053-3058.

[5] E.Greivenkamp and J.H.Bruning, "Phase shifting interferometry," in Optical Shop Testing, Ed. by D.Malacara (Wiley, New York, 1992), Chapter 14, pp. 501-598.

[6] P. de Groot. Phase-shift calibration errors in interferometers with spherical Fizeau cavities // Applied Optics.-1994.-V.34.-No.16.-pp.2856-2863.

[7] P. de Groot. 101-frame algorithm for phase shifting interferometry. EUROPTO, 1997, Preprint 3098-33.

[8] J. Millerd, N. Brock, J. Hayes, et al., "Modern Approaches in Phase Measuring Metrology," Proc. SPIE. 5856, 14-22 (2004).

[9] P. Gao, B. Yao, N. Lindlein, et al., "Phase-Shift Extraction for Generalized Phase-Shifting Interferometry," Opt.Lett., 2009, 34 (22), 3553-3555.

[10] Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. / Универсальный алгоритм расшифровки. // Научный вестник НГТУ. - 2010. - №4(41) - С. 51-58.

[11] Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайдуков Д.С., Вагизов А.Р. / Устранение ошибок фазового сдвига в интерферометрии // Автометрия. - 2011. - Т. 47, №1.-С. 96-101.

[12] V.I. Guzhov, S. P. Il'yinykh, D. S. Khaidukov and A. R. Vagizov Eliminating phase-shift errors in interferometry // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.-2011., Vol.47, Nu.1.- pp. 76-80

[13] Гужов В.И., Солодкин Ю.Н. Анализ точности определения полной разности фаз в целочисленных интерферометрах // Автометрия.-1992.-№6.-С.24-30.

[14] Schmit J., Creath K. Extended averaging technique for derivation of error-compensating algorithms in phase-shifting interferometry. //Applied Optics.-1995.-V.34.- No.19.-pp.3610-3619.



Гужов Владимир Иванович - декан факультета Автоматики и вычислительной техники в Новосибирского Государственного Технического университета, профессор, доктор технических наук. Он является автором 120 научных работ, в том числе является обладателем 4 патентов. Область научных интересов: программные системы, высокоточные измерения. E-mail: vig@nstu.edu.ru



Ильиных Сергей Петрович - доцент кафедры «Вычислительная техника» в НГТУ, доцент, кандидат технических наук, автор более 100 научных статей, в том числе, 4 патента и 1 учебник высшей школы. Область научных интересов и компетенций – лазерные измерительные системы, обработка изображений. E-mail: isp51@yandex.ru



Хайдуков Дмитрий Сергеевич - аспирант Новосибирского Государственного Технического университета.



Кузнецов Роман Александрович - аспирант Новосибирского Государственного Технического университета.

Идентификация линейных динамических систем с использованием концепции сепараторов параметрического пространства

Т.В.Авдеенко

Новосибирский государственный технический университет

Аннотация: Рассматривается проблема структурной идентифицируемости моделей в пространстве состояний. Мы предлагаем эффективный подход к анализу структурной идентифицируемости, включающий необходимое и достаточное условие для анализа как локальной, так и глобальной идентифицируемости, а также процедуры для элиминирования неидентифицируемости. В отличие от других методов данный подход требует значительно меньший объем символьных вычислений, и, таким образом, позволяет проводить анализ моделей больших размерностей. В настоящей статье описывается суть предлагаемого подхода, даются определения слабого, истинного и ложного сепараторов, а также алгоритм построения истинных сепараторов. Также рассматривается пример существования трех линейных сепараторов модельной структуры, соответствующих шести решениям задачи оценивания неизвестных параметров, выявляется их геометрическое расположение и свойства.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, идентифицируемость, линейные динамические модели в пространстве состояний, параметрическое пространство.

1. ВВЕДЕНИЕ

Параметрическая идентификация динамических систем предполагает прохождение двух последовательных этапов. На первом этапе на основе априорных знаний о закономерностях в изучаемой области строится математическая модель исследуемого объекта, включающая неизвестные параметры (как правило, константы). На втором этапе оцениваются неизвестные параметры модели на основе экспериментальных данных. Далее проверяется адекватность модели, в результате чего описанные выше этапы могут многократно повторяться для достижения хорошего соответствия модели реальному объекту или явлению.

Фундаментальной проблемой, решаемой в процессе параметрической идентификации является анализ априорной структурной идентифицируемости модели [1], в результате которого определяется число и расположение точек параметрического пространства (оценок неизвестных параметров), являющихся

решениями задачи параметрической идентификации. Если существует несколько точек параметрического пространства (не единственная точка), одинаково хорошо соответствующих экспериментальным данным, мы имеем неидентифицируемую модельную структуру. Таким образом, идентифицируемость есть свойство модельной структуры допускать одно или более решений задачи параметрической идентификации. Мы различаем *локальную идентифицируемость*, гарантирующую единственность решения только в некоторой окрестности произвольной точки параметрического пространства, а также *глобальную идентифицируемость*, когда существует единственное решение во всем параметрическом пространстве.

Представим более строгие определения различных типов идентифицируемости [2]. Обозначим совпадение входов и выходов модели, полученных для двух различных значений θ и θ^* вектора параметров $M(\theta) \approx M(\theta^*)$. Это свойство называется неразличимостью моделей по наблюдениям входа и выхода. Параметр θ_i называется структурно глобально идентифицируемым (СГИ) если почти для любого $\theta^* \in \Omega$ (за исключением подмножеств нулевой меры параметрического пространства Ω) выполняется $M(\theta) \approx M(\theta^*) \Rightarrow \theta_i = \theta_i^*$. Параметр θ_i называется структурно локально идентифицируемым (СЛИ), если почти для любого $\theta^* \in \Omega$ существует окрестность $v(\theta^*)$ такая что если $\theta \in v(\theta^*)$, то $M(\theta) \approx M(\theta^*) \Rightarrow \theta_i = \theta_i^*$. Локальная идентифицируемость, очевидно, является необходимым условием глобальной идентифицируемости. Параметр, который является СЛИ, но не является СГИ, называется структурно глобально неидентифицируемым (СГНИ). Параметр, который не является СЛИ, называется структурно локально неидентифицируемым (СНИ или СЛНИ). Модель $M(\theta)$ называется СГИ (СЛИ), если все ее параметры являются

СГИ (СЛИ). Модель называется СНИ, если какой-либо из ее параметров является СНИ.

В настоящей статье мы рассматриваем линейную модельную структуру в пространстве состояний. Для проверки структурной идентифицируемости таких моделей предлагались различные методы [3], [1]. Однако проблема заключается в том, что проверка структурной идентифицируемости достаточно простых моделей быстро приводит к очень сложным алгебраическим манипуляциям. Системы компьютерной математики (Maple, Matlab, Matcad) могут оказать большую помощь в проведении такого рода вычислений. Однако нельзя полагаться лишь на вычислительные мощности современных компьютеров в тех случаях, когда решаемые задачи (задачи символьной математики) относятся к классу NP-сложных. Проведение экспериментов с использованием программы Maple показало, что такие хорошо известные методы анализа идентифицируемости, как метод передаточной функции или метод матриц Маркова, позволяют исследовать модели с размерностью вектора состояний, не превышающей 4-6, с использованием средств символьной математики.

Нами разрабатывается подход к проверке структурной идентифицируемости, который не генерирует столь сложных вычислений, позволяя исследовать модели гораздо больших размерностей. В [4-6] предлагаются условия для проверки как локальной, так и глобальной идентифицируемости (условия ранга и порядка для локальной и глобальной идентифицируемости). Предварительные исследования выявили, что предлагаемый подход является очень перспективным. Объем символьных вычислений, производимых при применении условий ранга и порядка, оказался менее чувствительным к увеличению размерности модели, чем существующие методы. С использованием предлагаемых методов удалось повысить размерности моделей, которые могут быть исследованы чисто аналитически до 7-8 для глобального анализа и до 15 (и даже более) при анализе локальной идентифицируемости.

Кроме того, идея использования сепараторов параметрического пространства, возникшая в результате разработки данного подхода, оказывается еще более обещающей. Сильные сепараторы определяются как гиперповерхности, разделяющие параметрическое пространство на различные связные области. В каждой такой области существует одно и только одно решение задачи параметрической идентификации. Знание уравнений сильных сепараторов дает информацию о числе и локализации решений. Именно знание геометрии задачи представляет очевидный практический интерес. Данная информация может быть использована,

например, для разработки алгоритма оценивания параметров глобально неидентифицируемых моделей. Кроме того, формулы для уравнений сепараторов можно использовать для элиминирования глобальной неидентифицируемости. К сожалению, не существует прямолинейной процедуры нахождения сильных сепараторов. Однако в рамках разработанного подхода предлагается концепция истинного сепаратора. Исследование большого числа модельных структур позволяет предположить, что истинные сепараторы в действительности являются сильными сепараторами параметрического пространства.

В настоящей статье описывается суть предлагаемого подхода, даются определения истинного, слабого и ложного сепаратора и рассматривается интересный пример существования трех линейных сепараторов модельной структуры в пространстве состояний.

Мы показываем, что найденные истинные сепараторы в действительности являются сильными, они разделяют параметрическое пространство на шесть областей, каждая из которых содержит одно и только одно решение задачи параметрической идентификации.

II. УСЛОВИЯ РАНГА ДЛЯ АНАЛИЗА ЛОКАЛЬНОЙ И ГЛОБАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ

Разрабатываемый подход основан на представлении модельной структуры в пространстве состояний в виде естественной параметризации с линейными ограничениями на элементы системных матриц.

$$M(s): \begin{cases} \frac{d}{dt} x(t) = Ax(t) + Bu(t), & x(0) = 0, \\ y(t) = Cx(t), \end{cases} \quad (1)$$

$$\Gamma s = \Gamma^0, \quad (2)$$

где $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times k}$, $C \in R^{m \times n}$ - системные матрицы; s - вектор системных параметров, состоящий из элементов системных матриц, вытянутых по строкам $s^T = (\bar{A}^T, \bar{B}^T, \bar{C}^T)$, $s \in R^N$, $N = n^2 + nk + nm$, Γ и Γ^0 - числовые $r \times N$ - и $r \times 1$ - матрицы, $rg \Gamma = r$, $r < N$. Обозначим θ вектор неизвестных параметров размерности $N - r = p$, состоящий из независимых системных параметров, полученный из системы (2).

Предварительный этап предлагаемого метода заключается в вычислении специальных матриц: матрицы локальной идентифицируемости Γ_X и матрицы глобальной идентифицируемости Γ_X^* , где дополнительные матрицы X и X^* определяются следующим образом

$$X^* = X^*(\theta^*, \theta) = \begin{pmatrix} A(\theta^*) \otimes I_n - I_n \otimes A^T(\theta) \\ -I_n \otimes B^T(\theta) \\ C(\theta^*) \otimes I_n \end{pmatrix},$$

$$X = X^*(\theta^*, \theta) \Big|_{\theta^* = \theta} = \begin{pmatrix} A(\theta) \otimes I_n - I_n \otimes A^T(\theta) \\ -I_n \otimes B^T(\theta) \\ C(\theta) \otimes I_n \end{pmatrix}.$$

Исследование локальной идентифицируемости основывается на следующих необходимом и достаточном условиях локальной идентифицируемости (**условие ранга для СЛИ**):

$$\text{rank } GX = \text{cols}(GX) = n^2, \quad (3)$$

Почти для любого θ . Общий ранг символьной матрицы GX может быть вычислен с использованием любой из систем символьных вычислений, например, Matlab. Если СЛИ-матрица GX имеет полный столбцовый ранг, модель является СЛНИ. Мы называем ее моделью неполного ранга. В этом случае мы можем использовать специальные процедуры для элиминирования локальной неидентифицируемости [4].

Если модель оказывается СЛИ, следующим этапом является анализ глобальной идентифицируемости. Это наиболее сложная вычислительная процедура, основанная на предварительной проверке достаточного условия глобальной идентифицируемости (**условие ранга для СГИ**):

$$\text{rank } GX^* = \text{cols}(GX^*) = n^2, \quad (4)$$

сразу почти для всех θ и θ^* (за исключением точек, составляющих множества вида $e(\theta^*) = 0$ или $g(\theta) = 0$ с нулевой мерой).

Фундаментальным отличием условия (4) от условия (3) является то, что элементы СГИ-матрицы GX^* зависят от двух точек θ и θ^* . В этом случае невозможно использовать стандартную операцию вычисления общего ранга матрицы GX^* (встроенную во все системы символьных вычислений), так как элементы векторов θ и θ^* могут оказаться взаимно зависимыми. На самом деле задача заключается в построении зависимостей вида $f(\theta^*, \theta) = 0$ (связывающих две точки параметрического пространства) для которых условие (4) не выполняется. Такие зависимости могут быть найдены в результате факторизации (разложения на множители)

$$\det[(GX^*)^T GX^*] = \prod_i e_i(\theta^*) \prod_j g_j(\theta) \prod_{l=1}^L f_l(\theta^*, \theta) = 0 \quad (5)$$

Если в разложении на множители (5) нет множителей вида $f_l(\theta^*, \theta)$, то модель является СГИ в соответствие с достаточным условием (4). Если подобные множители присутствуют в разложении, модель может оказаться либо СЛИ, либо СГНИ. В данном случае можно использовать необходимое и достаточное условие СГИ [4].

Необходимым и достаточным условием СГИ модели является совместность следующей системы уравнений для всех l ($1 \leq l \leq L$) относительно неизвестных (T, θ^*) :

$$\begin{cases} f_l(\theta^*, \theta) = 0, \\ X^*(\bar{T} - \bar{I}_n) + s(\theta^*) - s(\theta) = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $\theta^* \in \Omega$, \bar{T} , \bar{I}_n - векторы, полученные из матриц T и I_n , вытянутых по строкам; I_n - единичная матрица порядка n , $T \in GL(n) = \{T : \det T \neq 0\}$ - матрица преобразования подобия. Второе матричное уравнение в (6) является исходной системой преобразования подобия, полученной в результате применения метода преобразования подобия, лежащего в основе разрабатываемого подхода.

Для некоторых практически значимых классов модельных структур мы получили специальные формы СЛИ и СГИ-матриц пониженной размерности. Этими классами являются следующие: класс со стандартными числовыми матрицами управления и наблюдения, класс с произвольными числовыми матрицами управления и наблюдения, класс со стандартными параметризованными матрицами управления и наблюдения, класс компартментальных моделей. Например, рассмотрим модельную структуру (1) со стандартными матрицами управления и наблюдения. Стандартные матрицы состоят из нулей и единиц по одной единице в каждой строке матриц B^T и C полного строчного ранга, $\text{rank } B = k$, $\text{rank } C = m$. Таким образом, вектор системных параметров s состоит только из элементов матрицы состояний $s = \bar{A}$, с линейными независимыми ограничениями на них:

$$\psi \bar{A} = \psi_0. \quad (7)$$

Для этого класса моделей условия ранга для локальной и глобальной идентифицируемости имеют вид:

$$\text{rank } \psi \Lambda(J^1, J^2) = (n - k)(n - m), \quad (8)$$

$$\text{rank } \Psi \Lambda^* (J^1, J^2) = (n-k)(n-m), \quad (9)$$

$$\Lambda^* (J^1, J^2) = A(\theta^*) I_n(J^2) \otimes I_n(J^1) - I_n(J^2) \otimes A^T(\theta) I_n(J^1)$$

$$\Lambda(J^1, J^2) = A(\theta) I_n(J^2) \otimes I_n(J^1) - I_n(J^2) \otimes A^T(\theta) I_n(J^1)$$

J^1 и J^2 - множества индексов, соответствующих нулевым столбцам матриц B^T и C соответственно, $I_n(J^i)$ - подматрица единичной матрицы I_n , состоящая из столбцов с номерами из J^i , $i = 1, 2$.

III. МЕТОД АНАЛИЗА ГЛОБАЛЬНОЙ ИДЕНТИФИЦИРУЕМОСТИ НА ОСНОВЕ СЕПАРАТОРОВ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

Использование необходимого и достаточного условия глобальной идентифицируемости предполагает проверку совместности L систем вида (6). Данный способ оказывается наиболее простым методом анализа глобальной идентифицируемости, так как обычно (с использованием других методов) для подобного анализа требуется решение некоторой системы нелинейных алгебраических уравнений в символьном виде. Однако возможно еще более упростить анализ, используя так называемые *сепараторы параметрического пространства*. Понятие сепаратора параметрического пространства было введено впервые в работах [7], [8].

Определение 1. *Сильными сепараторами* называются подпространства размерности $d-1$ (d - размерность параметрического пространства), разделяющие параметрическое пространство на различные связные области, в каждой из которых имеется одно и только одно решение задачи параметрической идентификации.

В соответствии с этим определением уравнения сильных сепараторов могут быть использованы для формирования неравенств, задающих границы областей, в каждой из которых находится единственное решение задачи параметрической идентификации. Следовательно, эти неравенства могут быть использованы для элиминирования глобальной неидентифицируемости.

К сожалению, не существует общего метода вычисления сильных сепараторов. В [8] приводятся очень простые примеры эвристического нахождения таких сепараторов с использованием теоремы коэрцитивности по норме. Однако общей методики их построения до сих пор не создано. Используя наш подход, мы видим возможность построения общего метода построения сильных сепараторов параметрического пространства.

Определение 2. *Слабым сепаратором* параметрического пространства назовем

равенство вида $f_l(\theta, \theta) = 0$, где

$$f_l(\theta, \theta) = f_l(\theta^*, \theta) \Big|_{\theta^* = \theta}, \quad f_l(\theta^*, \theta) = 0$$

- соотношение, для которого условие (4) не выполняется. Слабый сепаратор, соответствующий совместной системе уравнений (6), называется *истинным*. Слабый сепаратор, соответствующий несовместной системе уравнений (6), называется *ложным*.

Заметим, что равенства, полученные из множителей $e_i(\theta^*)$ и $g_j(\theta)$ соотношения (5), с самого начала не рассматриваются в качестве кандидатов для построения сепараторов параметрического пространства. Действительно, уравнения $e_i(\theta^*) = 0$ и $g_j(\theta) = 0$ очевидно являются несовместными с системой (6) и не могут играть роль сильных сепараторов.

В соответствии с необходимым и достаточным условиями для СГИ, существование, по меньшей мере, одного сепаратора означает то, что модель является глобально неидентифицируемой, т.е. фактически приводит к сепарированию параметрического пространства. Следовательно, имеется веское основание думать, что истинные сепараторы являются в действительности сильными сепараторами, которые могут быть использованы для элиминирования глобальной неидентифицируемости.

Таким образом, предложенный метод анализа глобальной идентифицируемости с использованием сепараторов естественным образом распадается на два этапа. На первом этапе необходимо определить соотношения $f_l(\theta^*, \theta) = 0$, для которых не выполняется условие ранга для СГИ, после чего построить уравнения слабых сепараторов, для которых не выполняется условие ранга для СГИ $f_l(\theta, \theta) = f_l(\theta^*, \theta) \Big|_{\theta^* = \theta} = 0$. На втором этапе для каждого слабого сепаратора, найденного на первом этапе, проверяется, является ли он истинным или ложным.

Очевидным (однако, неэффективным) методом определения слабых сепараторов $f_l(\theta^*, \theta) = 0$ является факторизация (5). Однако, матрица $(GX^*)^T GX^*$ в (5) имеет сложный символьный вид, и факторизация ее определителя часто приводит к неудаче по причине комбинаторного взрыва, даже для моделей небольших размерностей. Следующая теорема, доказанная в [6], оказывается полезной в построении эффективного алгоритма.

Теорема 1. Условие ранга для СГИ (4) не выполняется для соотношения $f(\theta^*, \theta) = 0$:

$$\text{rank } GX^* \Big|_{f(\theta^*, \theta) = 0} < \text{cols}(GX^*) = n^2, \quad (10)$$

тогда и только тогда, когда $f(\theta^*, \theta)$ является общим множителем определителей всех квадратных невырожденных подматриц размерности n^2 СГИ-матрицы $G X^*$.

С использованием теоремы 1 можно существенно упростить вычисление множителей $f(\theta^*, \theta)$ по сравнению с прямой факторизацией (5). Вместо факторизации определителя сложной матрицы $[(G X^*)^T G X^*]$ можно факторизовать определитель любой невырожденной квадратной подматрицы размерности n^2 СГИ матрицы $G X^*$, а затем выбрать только те множители, которые действительно уменьшают ранг матрицы $G X^*$, т.е. действительно являются множителями всех других невырожденных n^2 - подматриц матрицы $G X^*$. Эффективность предложенного метода следует из того факта, что матрица $G X^*$ имеет намного более простой символичный вид зависимостей элементов от своих аргументов, чем матрица $[(G X^*)^T G X^*]$.

Факторизация определителя может быть еще более упрощена, если перестановками строк и столбцов предварительно привести матрицу $G X^*$ к блочно-треугольному виду с блоками на диагонали, имеющими меньшую размерность, чем исходная матрица. В результате имеем следующий алгоритм вычисления слабых сепараторов:

1) Выбираем произвольную квадратную невырожденную n^2 - подматрицу K матрицы $G X^*$;

2) Перестановками строк и столбцов приводим матрицу K к блочно-треугольному виду с блоками K_{ii} , $i = \overline{1, q}$, на диагонали возможно меньшей размерности:

$$\det K = \det K_{11} \det K_{22} \dots \det K_{qq};$$

3) Факторизуем каждый блок и получаем разложение на множители

$$\det K = \prod_i e_i(\theta^*) \prod_j g_j(\theta) \prod_l f_l(\theta^*, \theta),$$

объединяя множители всех блоков;

4) Проверяем для всех l условие

$$\text{rank } G X^* \Big|_{f_l(\theta^*, \theta)=0} < \text{cols}(G X^*) = n^2 \quad (11)$$

(11) имеет место, то множитель $f_l(\theta^*, \theta)$ формирует слабый сепаратор $f_l(\theta, \theta) = 0$.

На втором этапе анализа глобальной идентифицируемости проверяется условие истинности для всех полученных слабых сепараторов. Одним из методов проверки является непосредственное применение необходимого и достаточного условия для СГИ, основанного на проверке совместности системы

уравнений (6). Однако существует возможность использовать более простой метод, не требующий даже проверки совместности системы нелинейных алгебраических уравнений. Этот метод основан на критерии истинности сепаратора, сформулированного как гипотеза, подтвержденная большим количеством разнообразных исследованных моделей.

Критерий истинности сепаратора (гипотеза). Предположим, что на первом этапе анализа глобальной идентифицируемости мы получили уравнение слабого сепаратора

$$f(\theta, \theta) = f(\theta^*, \theta) \Big|_{\theta^* = \theta} = 0.$$

Рассмотрим дополнительную модельную структуру M_f , полученную добавлением нового ограничения $f(\theta, \theta) = 0$ к первоначальной модельной структуре (1)-(2). Предположим, что модельная структура M_f является структурно управляемой и структурно наблюдаемой. При этих предположениях сепаратор $f(\theta, \theta) = 0$ является истинным тогда и только тогда, когда модельная структура M_f локально идентифицируема.

Заметим, что этот критерий позволяет проверять истинность сепаратора только в том случае, если дополнительная модельная структура M_f оказывается управляемой и наблюдаемой. Если это условие не имеет места, то нет возможности использовать данный критерий. В данном конкретном случае проверка совместности системы уравнений остается единственной процедурой нахождения ответа.

IV. ПРИМЕР

Рассмотрим модель в пространстве состояний со следующими системными матрицами:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, C = (0 \ 0 \ 1),$$

на элементы которых наложены 5 независимых ограничений

$$a_{12} = a_{13} = a_{23} = a_{31} = a_{11} + a_{21} + a_{31} = 0.$$

Эта модельная структура принадлежит классу моделей со стандартными числовыми матрицами управления и наблюдения. Матрица ограничений Ψ на системные параметры имеет вид:

$$\Psi = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Сформируем вектор независимых системных параметров θ , состоящий из $9 - 5 = 4$ элементов:

$$\theta = (\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4)^T = (a_{21}, a_{22}, a_{32}, a_{33})^T.$$

Проверка условия ранга для СЛИ дает

$$\begin{aligned} \text{rank } \Psi\Lambda(J^1, J^2) &= \text{cols } \Psi\Lambda(J^1, J^2) \\ &= (n-k)(n-m) = 4, \end{aligned}$$

где $J^1 = \{2, 3\}$, $J^2 = \{1, 2\}$,

$$\Psi\Lambda(J^1, J^2) = \begin{bmatrix} -a_{21} - a_{22} & -a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & -a_{21} - a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & 0 & a_{22} - a_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_{21} & 0 & -a_{21} & 0 \end{bmatrix}$$

Таким образом, модель является СЛИ. Анализ глобальной идентифицируемости начинается с вычисления СГИ-матрицы:

$$\Psi\Lambda^*(J^1, J^2) = \begin{bmatrix} -a_{21}^* - a_{22} & -a_{32} & 0 & 0 \\ 0 & -a_{21}^* - a_{33} & 0 & 0 \\ 0 & a_{21} & 0 & a_{22}^* - a_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_{21} & 0 & -a_{21} & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det(\Psi\Lambda^*)^T(\Psi\Lambda^*)$$

$$= a_{21}^2 (a_{22}^* - a_{33})^2 (a_{21}^* + a_{22})^2 (a_{21}^* + a_{33})^2.$$

Вычисляем соотношения, для которых условие ранга не выполняется, т.е.

$$\text{rank } \Psi\Lambda^*(J^1, J^2) < 4:$$

$$\begin{aligned} f_1(\theta^*, \theta) &= a_{22}^* - a_{33} = 0, \\ f_2(\theta^*, \theta) &= a_{21}^* + a_{22} = 0, \\ f_3(\theta^*, \theta) &= a_{21}^* + a_{33} = 0. \end{aligned}$$

Из последних соотношений имеем уравнения слабых сепараторов:

$$\begin{aligned} f_1(\theta, \theta) &= \theta_2 - \theta_4 = a_{22} - a_{33} = 0, \\ f_2(\theta, \theta) &= \theta_1 + \theta_2 = a_{21} + a_{22} = 0, \\ f_3(\theta, \theta) &= \theta_1 + \theta_4 = a_{21} + a_{33} = 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Легко проверить, что каждое из уравнений (12) приводит к совместной системе (6), поэтому все три сепаратора являются истинными. Исследуем их свойства и геометрию. Покажем, что истинные сепараторы (12) в действительности являются сильными сепараторами, т.е. разделяют параметрическое пространство на различные связанные подмножества, каждое из которых содержит единственное решение задачи параметрической идентификации (фактически задачи оценивания неизвестных параметров модели).

Для начала заметим, что третье уравнение системы (12) линейно зависит от двух первых уравнений. Поэтому три гиперповерхности, соответствующих этим сепараторам, пересекаются по прямой линии (не в точке). Таким образом, целое параметрическое пространство разделяется на шесть областей. Следовательно,

имеется 6 решений задачи параметрической идентификации. Действительно, решая систему уравнений подобия, мы получаем в точности шесть решений задачи параметрической идентификации:

$$(\theta^*)_{(1)} = H_1(\theta) = \begin{pmatrix} a_{21}^* = a_{21} \\ a_{22}^* = a_{22} \\ a_{32}^* = a_{32} \\ a_{33}^* = a_{33} \end{pmatrix},$$

$$(\theta^*)_{(2)} = H_2(\theta) = \begin{pmatrix} a_{21}^* = a_{21} \\ a_{22}^* = a_{33} \\ a_{32}^* = a_{32} \\ a_{33}^* = a_{22} \end{pmatrix},$$

$$(\theta^*)_{(3)} = H_3(\theta) = \begin{pmatrix} a_{21}^* = -a_{22} \\ a_{22}^* = -a_{21} \\ a_{32}^* = -\frac{a_{32}a_{21}}{a_{22}} \\ a_{33}^* = a_{33} \end{pmatrix},$$

$$(\theta^*)_{(4)} = H_4(\theta) = \begin{pmatrix} a_{21}^* = -a_{22} \\ a_{22}^* = a_{33} \\ a_{32}^* = -\frac{a_{32}a_{21}}{a_{22}} \\ a_{33}^* = -a_{21} \end{pmatrix},$$

$$(\theta^*)_{(5)} = H_5(\theta) = \begin{pmatrix} a_{21}^* = -a_{33} \\ a_{22}^* = -a_{21} \\ a_{32}^* = -\frac{a_{32}a_{21}}{a_{33}} \\ a_{33}^* = a_{22} \end{pmatrix},$$

$$(\theta^*)_{(6)} = H_6(\theta) = \begin{pmatrix} a_{21}^* = -a_{33} \\ a_{22}^* = a_{22} \\ a_{32}^* = -\frac{a_{32}a_{21}}{a_{33}} \\ a_{33}^* = -a_{21} \end{pmatrix}.$$

Покажем, что для произвольной точки θ параметрического пространства решения $(\theta^*)_{(1)}$

and $(\theta^*)_{(2)}$ всегда разделяются сепаратором - гиперповерхностью

$f_1(\theta, \theta) = \theta_2 - \theta_4 = a_{22} - a_{33} = 0$. Более того, эта гиперповерхность пересекает отрезок между этими двумя точками ровно посередине. Точки z отрезка определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} z &= (1-\alpha)(\theta^*)_{(1)} + \alpha(\theta^*)_{(2)} \\ &= \begin{pmatrix} (1-\alpha)a_{21} + \alpha a_{21} \\ (1-\alpha)a_{22} + \alpha a_{33} \\ (1-\alpha)a_{32} + \alpha a_{32} \\ (1-\alpha)a_{33} + \alpha a_{22} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{21} \\ a_{22} + \alpha(a_{33} - a_{22}) \\ a_{32} \\ a_{33} + \alpha(a_{22} - a_{33}) \end{pmatrix}, \\ & \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \end{aligned}$$

Найдем точку пересечения вышеупомянутого отрезка с гиперповерхностью

$$f_1(\theta, \theta) = \theta_2 - \theta_4 = a_{22} - a_{33} = 0 :$$

$$f_1(z, z) = z_2 - z_4 = (a_{22} - a_{33})(1 - 2\alpha) = 0 .$$

Точка z удовлетворяет уравнению сепаратора при $\alpha = 1/2$, т.е. отрезок, соединяющий две

произвольные точки-решения $(\theta^*)_{(1)}$ и $(\theta^*)_{(2)}$

(произвольные, так как зависят от произвольной точки θ), разделяется гиперповерхностью $f_1(\theta, \theta) = 0$ в точности посередине. Поэтому истинный сепаратор

$$f_1(\theta, \theta) = \theta_2 - \theta_4 = a_{22} - a_{33} = 0$$

является на самом деле сильным сепаратором, разделяющим решения $(\theta^*)_{(1)}$ и $(\theta^*)_{(2)}$. Назовем такие решения *смежными решениями*.

Более того, легко показать, что отрезок, соединяющий точки-решения $(\theta^*)_{(1)}$ и $(\theta^*)_{(2)}$ перпендикулярен гиперповерхности

$$f_1(\theta, \theta) = a_{22} - a_{33} = 0 ,$$

Которая в координатах z выражается как $z_2 - z_4 = 0$. Действительно, уравнение прямой линии в канонической форме может быть найдено, выражая параметр α из уравнения $z_2 = a_{22} + \alpha(a_{33} - a_{22})$ с последующей подстановкой его в уравнение $z_4 = a_{33} + \alpha(a_{22} - a_{33})$. В результате получаем каноническое уравнение прямой в виде $\frac{z_4 - a_{33}}{1} = \frac{z_2 - a_{22}}{-1}$. Теперь становится очевидным, что выполняется условие перпендикулярности этой прямой к плоскости $z_2 - z_4 = 0$:

$$\frac{-1}{1} = \frac{1}{-1} .$$

Таким же образом можно показать, что гиперповерхность $f_1(\theta, \theta) = a_{22} - a_{33} = 0$ является сильным сепаратором пар решений $(\theta^*)_{(3)}$ и $(\theta^*)_{(4)}$, а также $(\theta^*)_{(5)}$ и $(\theta^*)_{(6)}$, т.е. эти пары также являются смежными решениями.

Легко убедиться, что сепаратор $f_2(\theta, \theta) = \theta_1 + \theta_2 = a_{21} + a_{22} = 0$ разделяет напополам отрезки между тремя парами точек $(\theta^*)_{(1)}$ и $(\theta^*)_{(3)}$, $(\theta^*)_{(2)}$ и $(\theta^*)_{(5)}$, $(\theta^*)_{(4)}$ и $(\theta^*)_{(6)}$. Сепаратор $f_3(\theta, \theta) = a_{21} + a_{33} = 0$ аналогично делит отрезки между точками $(\theta^*)_{(1)}$ и $(\theta^*)_{(6)}$, $(\theta^*)_{(2)}$ и $(\theta^*)_{(4)}$, $(\theta^*)_{(3)}$ и $(\theta^*)_{(5)}$.

Пространственное расположение решений задачи оценивания параметров для случая, когда точка θ расположена в области, ограниченной сепараторами $f_1(\theta, \theta) = 0$ и $f_2(\theta, \theta) = 0$, показано на *рис. 1*. Так как ранг системы (12)

равен 2, возможно представить расположение областей и решений в двумерном пространстве. Каждая прямая линия на *рис. 1* соответствует проекции сепаратора на плоскость, перпендикулярную прямой линии, являющейся пересечением трех сепараторов (центральная точка соответствует этому пересечению).

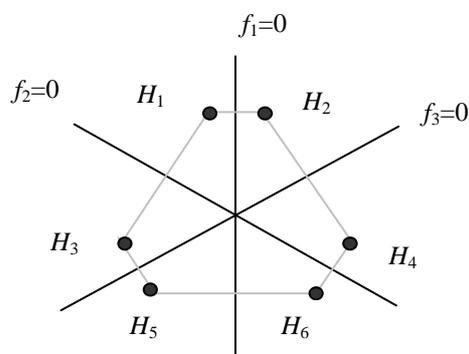


Рис. 1. Пространственное расположение решений $H_1, H_2, H_3, H_4, H_5, H_6$ и сепараторов f_1, f_2, f_3

Из только что рассмотренного примера, а также на основании анализа идентифицируемости множества других моделей можно заключить следующее. Во-первых, во всех рассмотренных моделях истинные сепараторы в действительности оказывались сильными сепараторами. Во-вторых, число решений задачи параметрической идентификации равно числу связных областей, сформированных множеством сепараторов. Например. В случае одного линейного сепаратора мы имеем два решения. В-третьих, в случае линейных сепараторов смежные решения расположены на одинаковом расстоянии от сепаратора, причем соединяющий точки отрезок перпендикулярен гиперплоскости сепаратора. В-четвертых, в случае линейных сепараторов отображение $H_i : \Omega \rightarrow \Omega$, переводящее точку $(\theta^*)_{(1)} = \theta$ в смежную с ней точку $(\theta^*)_{(i)} = H_i(\theta)$ имеет обратное отображение $H_i^{-1} = H_i$. Для нашего примера решения $(\theta^*)_{(2)}$, $(\theta^*)_{(3)}$ and $(\theta^*)_{(6)}$ являются смежными точками $(\theta^*)_{(1)} = \theta$, поэтому $H_i^{-1} = H_i$ для $i = 2, 3, 6$.

V. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа поддержана грантом Министерства образования и науки РФ, проект ТП-8.536.2011 «Разработка интеллектуальных технологий, средств компьютерного моделирования и эффективных методов оптимизации, как функционального наполнения информационно-аналитических систем поддержки принятия решений».

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предлагается эффективный подход к анализу структурной идентифицируемости моделей в пространстве состояний. Рассматривается новый метод анализа глобальной идентифицируемости на основе поиска сепараторов параметрического пространства. Предлагается двухшаговая процедура построения истинных сепараторов. На первом этапе мы находим слабые сепараторы как соотношения, для которых не выполняется достаточное условие глобальной идентифицируемости (условие ранга для СГИ).

Предложенные методы позволяют существенно уменьшить объем символьных вычислений, генерируемых в процессе анализа идентифицируемости модельной структуры, и, таким образом, увеличить размерность моделей, которые могут быть исследованы с использованием чисто символьных вычислений (с 7-8 для глобального анализа до 15 и больше для анализа локальной идентифицируемости).

Уравнения сепараторов, построенные с помощью предлагаемого подхода, могут быть очень полезными для элиминирования глобальной неидентифицируемости, а также в алгоритмах оценивания неизвестных параметров.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ljung L. and T.Glad On global identifiability for arbitrary model parametrization. *Automatica* 30, 1994, pp. 265-276.
- [2] Walter E. *Identifiability of state space models*/ Berlin, Germany: Springer-Verlag. – 1982. – 197 p.
- [3] Audoly, S., L. D'Angio, M.P. Saccomany and C. Cobelli. Global identifiability of linear compartmental

models - a computer algebra algorithm. *IEEE Trans. Automat. Contr.* 45, 1998, pp. 36-47.

[4] Avdeenko T.V. (2002). On structural identifiability of system parameters of linear models. *Proc. of 15 IFAC World Congress*. Barcelona, Spain. 6 p.

[5] Авдеенко Т.В., Горский В.Г. Построение динамических моделей в пространстве состояний: анализ структурной идентифицируемости: монография. Новосибирск: Изд-во НГТУ (Серия "Монографии НГТУ"), 2007, 292 с.

[6] Avdeenko T.V. A Versatile Approach to Structural Identifiability Test of Linear Systems using Parameter Space Separators. *Proc. of the 17th IASTED International Conference on Applied Simulation and Modelling (ASM-2008)*, Corfu, Greece. 2008. P. 255-260.

[7] Delforge J., L.d'Angio and S.Audoly. Results and conjectures on the global identifiability of linear systems. *Proc. of the 7th IFAC/IFORS Symposium on Identification and System Parameter Estimation*, 1985. 1. pp. 517-522. Pergamon. York.

[8] Delforge J., L.d'Angio and S.Audoly. Results and conjectures on the identifiability of linear systems. – In: *Identifiability of parametric models*. (E. Walter (Ed.)). 1987, pp. 21–31. Pergamon Press, Oxford.



Авдеенко Татьяна Владимировна – доктор технических наук, профессор, работает заведующей кафедрой Экономической информатики Новосибирского государственного технического университета. Является автором 105 публикаций. Область научных интересов – моделирование, идентификация, оптимизация, интеллектуальные информационные системы.

E-mail: tavdeenko@mail.ru

Численная оптимизация ПИД-регуляторов с использованием детектора правильности движения в целевой функции

Жмудь В.А.^{1, 2, 3}, Ядрышников О.Д.²
¹ФГБОУ ВПО НГТУ, ²НИУ НГУ, ³ОАО «НИПС», Россия
oao_nips@bk.ru

Аннотация. Оптимизация регулятора в системах, склонных к колебаниям вследствие специфики модели объекта трудно осуществить численными методами даже при наличии хорошо апробированной методики. В статье предложены способы модификации целевой функции, позволяющие эффективно решить эту задачу. Результативность предложенного подхода продемонстрирована на примерах.¹

Ключевые слова: численная оптимизация, регуляторы, автоматика, моделирование, динамические системы, точность управления

ВВЕДЕНИЕ

Высокотехнологическое производство научные исследования и другие отрасли технической деятельности требуют совершенствования методов управления в контуре с отрицательной обратной связью. В таких системах для достижения требуемой точности и качества управления применяются ПИД-регуляторы или их модификации [1–5]. Вычисление параметров настройки регуляторов может быть осуществлено, например, методами численной оптимизации [2–9]. Ряд объектов обладают математической моделью, которая затрудняет применение этого способа. К таким особенностям можно отнести высокую склонность к колебаниям, особенно, при замыкании отрицательной обратной связи.

В данной статье рассматривается несколько приемов, развивающих методику численной оптимизации регуляторов для таких систем.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Общий вид ПИД-регулятора задается уравнением:

¹ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

$$W_R(s) = K_P + K_I / s + K_D s. \quad (1)$$

Здесь K_P , K_I , K_D – коэффициенты усиления различных каналов регулятора, s – аргумент преобразования Лапласа или символический оператор дифференцирования в случае использования дифференциальных уравнений. Многие статьи предлагают определение коэффициентов методом *Зигеля-Никольса* [4]. Этот выбор очевидно не оптимален, поскольку этот метод не самый эффективный для достижения наилучшего качества управления.

Нами ранее разработана методика расчета этих коэффициентов путем моделирования в программе VisSim и численной оптимизации по критерию, содержащему интеграл от модуля ошибки управления, умноженному на время с момента начала переходного процесса.

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

Применение такого метода не дает результата по следующим причинам.

1. Процедура оптимизации прерывается вследствие достижения какой-либо вычисленной величиной максимально допустимого для программы значения 10^{303} . Данный вид прерывания не дает возможности получения хотя бы промежуточного результата оптимизации.

2. Если удастся осуществить оптимизацию без проблемы, указанной в предыдущем пункте, результат оптимизации дает систему с неудовлетворительным переходным процессом, содержащим слишком большое перерегулирование и (или) множество колебаний.

II. МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ ЦЕЛЕВОЙ ФУНКЦИИ

В целевую функцию (2) предлагается внести ограничение ее величины по модулю большим значением, например, 10^8 . Это предотвратит прерывание по пункту 1.

$$\Psi_1(T, \Psi) = \begin{cases} 10^8, \Psi > 10^8; \\ \Psi, -10^8 < \Psi < 10^8; \\ -10^8, \Psi < -10^8. \end{cases} \quad (3)$$

В целевую функцию (2) также предлагается внести под интеграл произведение ошибки на ее производную, умноженную на большой коэффициент усиления. Логика этой модификации заключается в том, что если ошибка и ее производная совпадают по знаку, это означает неправильное развитие переходного процесса: ошибка возрастает, когда должна убывать или убывает, когда должна возрастать. Наличие таких участков переходного процесса нежелательно, такие участки возникают при перерегулировании и при колебаниях.

$$\Psi_2(T) = \int_0^T \{R[e(t)de(t)/dt] + |e(t)|t\}dt. \quad (4)$$

$$R[f] = \begin{cases} f, f > 0; \\ 0, f < 0. \end{cases} \quad (5)$$

$$\Psi_3(T) = \Psi_1(T, \Psi_2). \quad (6)$$

Здесь R – детектор колебаний.

Пример 1. Рассмотрим объект с передаточной функцией

$$W_1(s) = (-6s + 3) / (5s^2 + 3s + 1). \quad (7)$$

На рис. 1 показана схема моделирования и оптимизации системы с объектом (3) и регулятором (1). Применена целевая функция (4) с ограничением.

Результатом оптимизации является следующий набор коэффициентов регулятора: $K_P = 0,67$; $K_I = 0,1259$; $K_D = 0,787$. Целевая функция при этом равна 1,757 на интервале до 100 с.

Этот результат не является робастным, то есть при небольших изменениях параметра объекта или регулятора устойчивость нарушается. В переходном процессе имеется небольшое перерегулирование, процесс происходит с несколькими колебаниями.

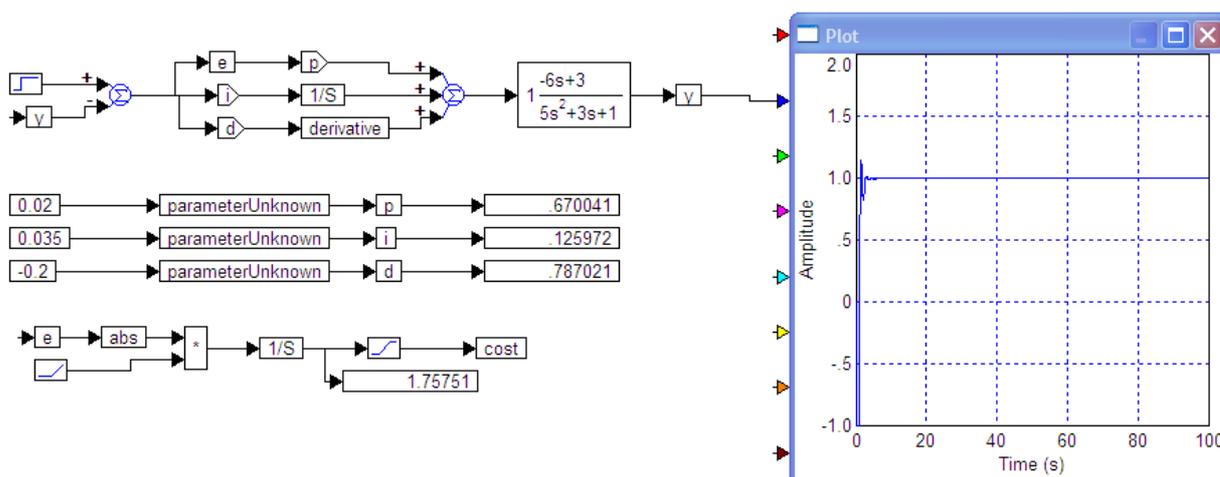


Рис. 1. Структура для моделирования и оптимизации задачи Примера 1 с ограничением целевой функции и результат оптимизации

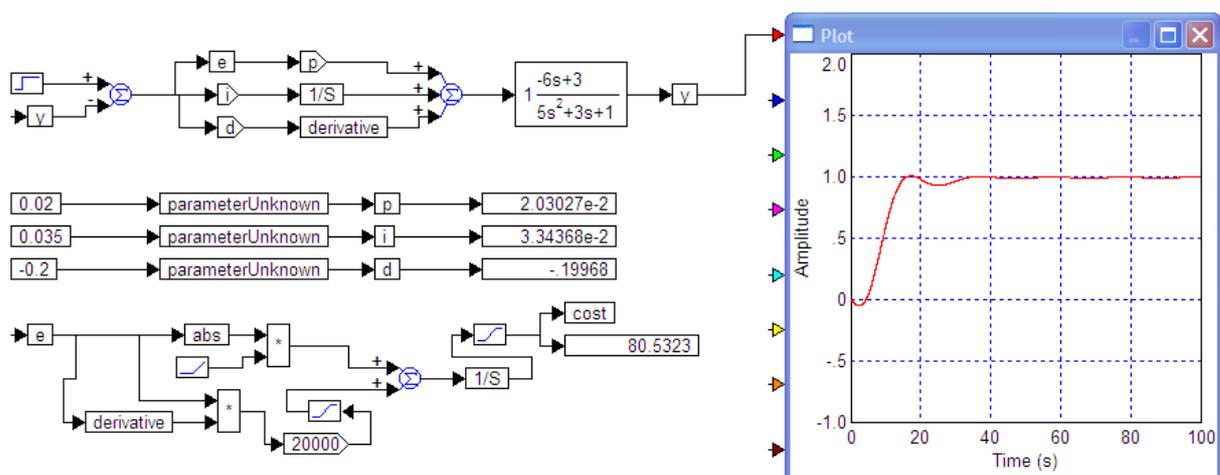


Рис. 2. Структура с модификацией путем введения детектора колебаний и результат оптимизации

На *рис. 2* показана структура для решения той же задачи с применением детектора колебаний на основе произведения ошибки и ее производной (6). В результате оптимизации получены другие коэффициенты регулятора: $K_P = 0,0203$; $K_I = 0,0334$; $K_D = -0,199$. Длительность переходного процесса увеличивается, но полученный результат является робастным, то есть в меньшей степени устойчивость и качество переходного процесса зависит от точности реализации коэффициентов регулятора.

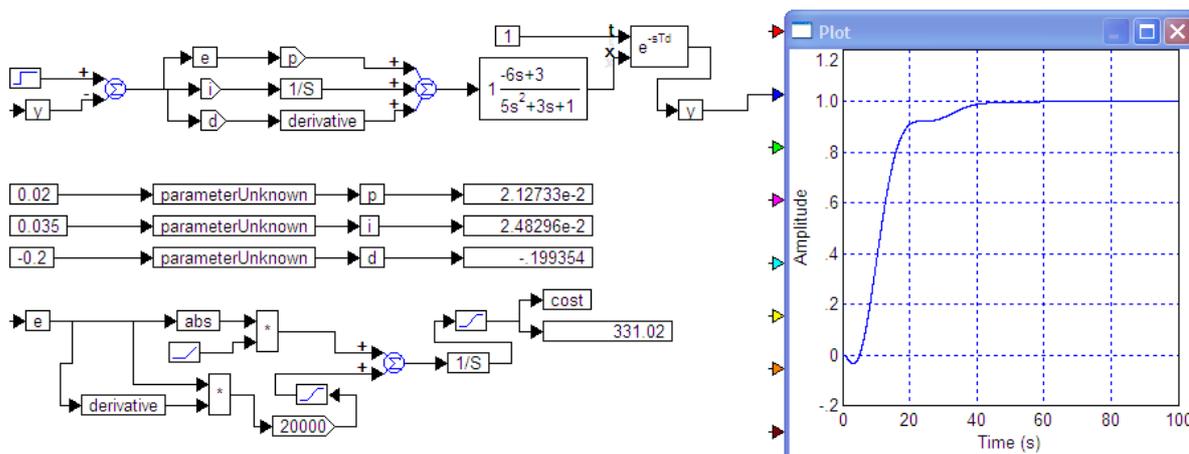


Рис. 3. Структура с модификацией по Примеру 2

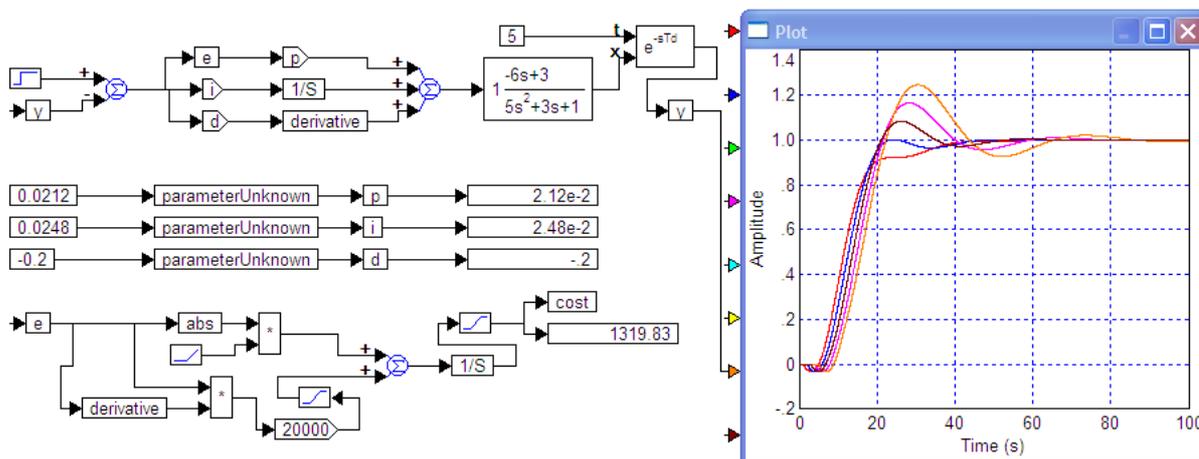


Рис. 4. Структура с модификацией по Примеру 3 с запаздыванием от 1 до 5 с

Пример 2. Введем в объект из Примера 1 звено запаздывания. С регулятором, рассчитанным вторым способом в Примере 1, система остается устойчивой. Процедура оптимизации дает уточненный результат, показанный на *рис. 3*.

Робастность этого результата подтверждается серией переходных процессов, полученных при различных значениях запаздывания от 1 до 5 с.

Пример 3. Введем в тот же объект запаздывание 8 с. Получаем результат, показанный на *рис. 4*. Робастность подтверждается для значений запаздывания 12 с, система остается устойчивой и при значениях до 20 с, однако перерегулирование в этом случае возрастает до величины 50 %.

Для значений запаздывания от 16 до 24 с также может быть рассчитан робастный регулятор, результаты этого расчета показаны на *рис. 6*.

Пример 4. Рассмотрим объект, передаточная

функция которого дана соотношением:

$$W_1(s) = 1 / (10 s^3 + 4 s^2 + 2 s + 1). \quad (3)$$

Объект характеризуется сильной склонностью к колебаниям. Переходный процесс самого объекта без системы при воздействии ступенчатого скачка показан на *рис. 7*, это – колебания с возрастающей амплитудой.

В результате оптимизации получены следующие коэффициенты регулятора: $K_P = -0,59$; $K_I = 0,0429$; $K_D = -0,1537$. Мы видим, что переходный процесс вначале идет в противоположную сторону, то есть ошибка вначале возрастает. Эта ситуация не желательна, однако, система устойчива и успешно завершает переходный процесс, сводя ошибку к нулю.

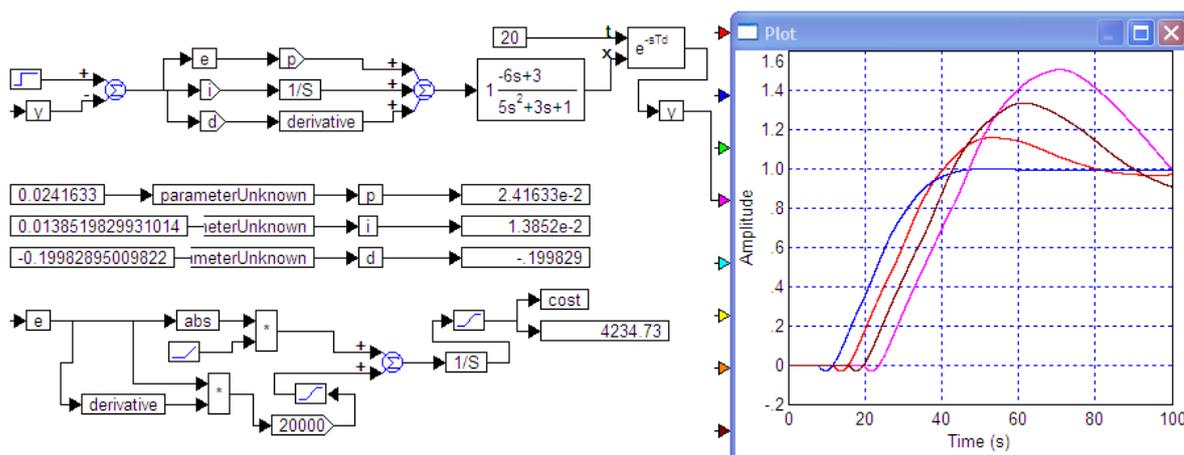


Рис. 5. Структура с модификацией по Примеру 3 с запаздыванием от 8 до 20 с

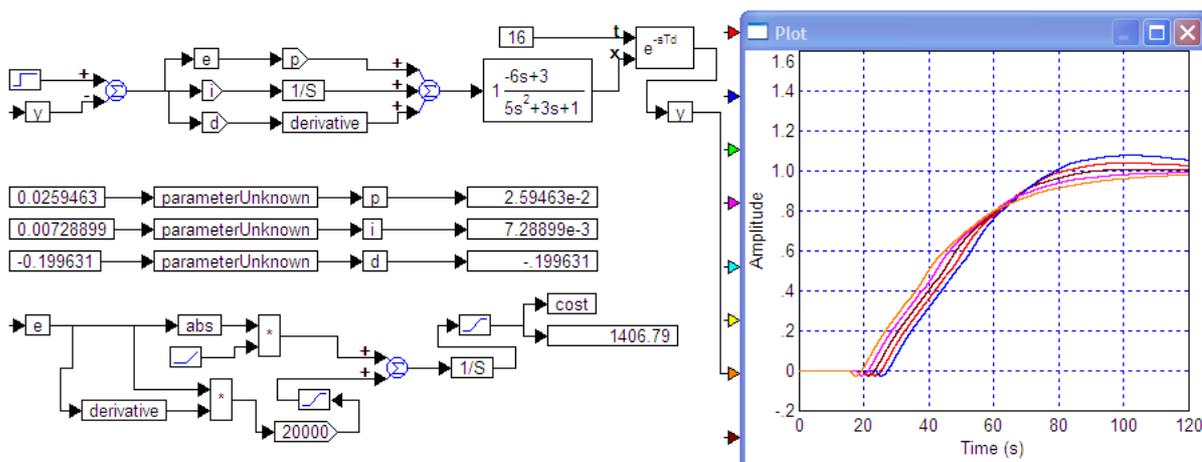


Рис. 6. Структура с модификацией по Примеру 3 с запаздыванием от 16 до 24 с

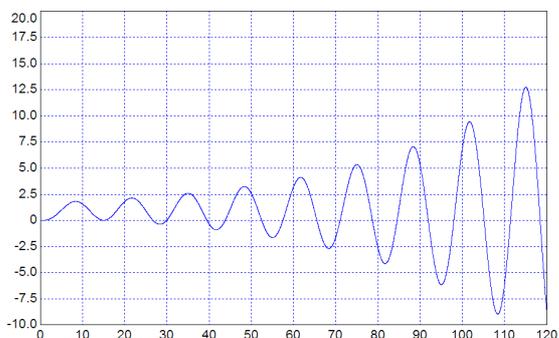


Рис. 7. Переходный процесс в объекте из Примера 4 без регулятора

Для оценки этого результата рассмотрим один из альтернативных методов решения этой задачи из Примера 4. Альтернативный метод состоит в введении в регулятор звена, которое компенсирует нежелательный полином знаменателя передаточной функции объекта введением такого же полинома в числитель звена, включаемого на входе объекта. При этом в знаменателе такого звена помещается полином, обеспечивающий более благоприятный переходный процесс.

Для иллюстрации действия этого компенсирующего звена на рис. 9 показаны два переходных процесса: переходный процесс с

колебаниями соответствует передаточной функции объекта, а переходный процесс без колебаний – передаточной функции модели с благоприятным полиномом в знаменателе. На рис. 10 показан переходный процесс компенсирующего звена.

Полученный объект совместно с компенсатором можно рассматривать как новый объект, для которого можно осуществить численную оптимизацию регулятора. Структура для такой оптимизации и ее результат показаны на рис. 11.

Если бы моделирование осуществлялось только на интервале 90 с, можно было бы сделать **ошибочный** вывод, что результат оптимизации соответствует поставленной задаче. Моделирование на дальнейшем интервале показывает, что система неустойчива. После достижения нулевого значения ошибки выходной сигнал системы начинает колебаться около равновесного состояния с возрастающей амплитудой. При отличии только одного коэффициента компенсатора на 5% в любую сторону (коэффициент при первой степени s) колебания начинаются раньше и возрастают быстрее, как показано на рис. 12.

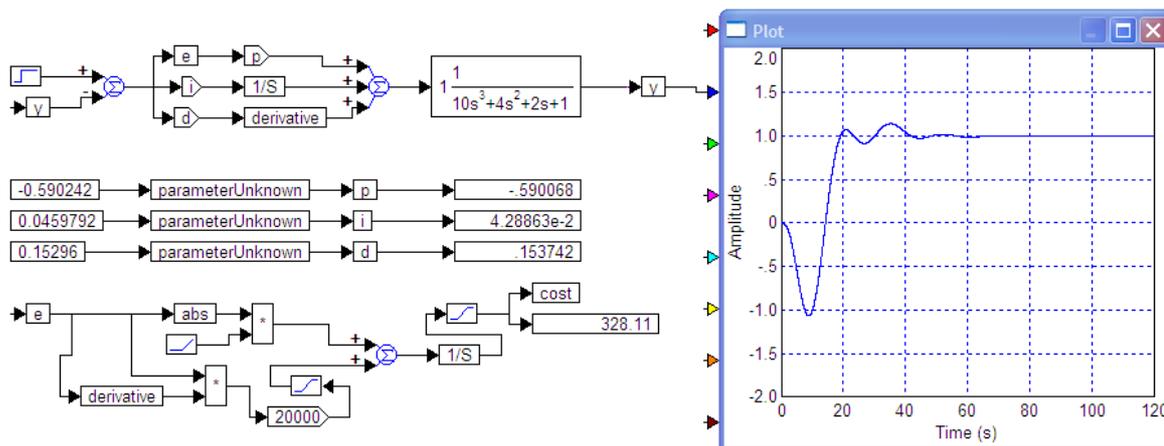


Рис. 8. Структура с модификацией по Примеру 4 и результат оптимизации регулятора

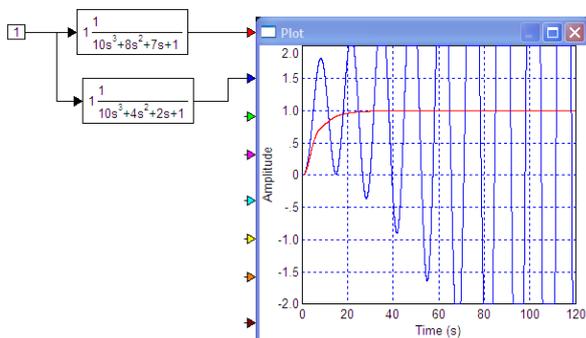


Рис. 9. Структура и переходные процессы звеньев объекта и улучшенной модели

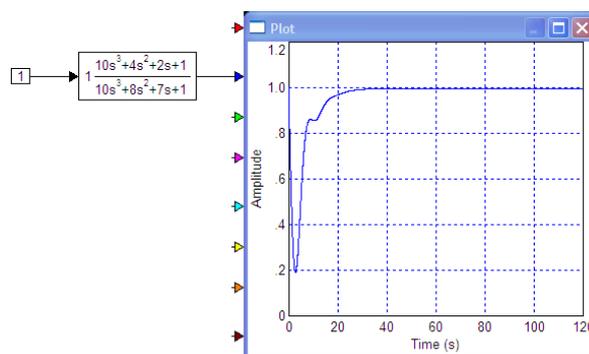


Рис. 10. Структура и переходный процесс компенсационного звена

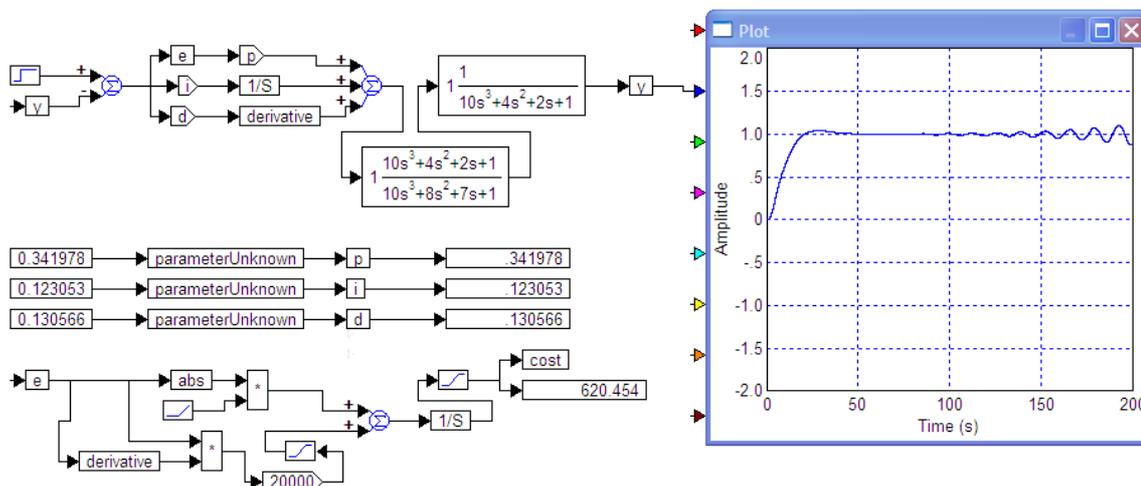


Рис. 11. Структура с модификацией по Примеру 4 с компенсационным звеном и результат оптимизации регулятора

Таким образом, следует признать, что метод с компенсирующим элементом ненадежен, получаемый результат неудовлетворителен.

При моделировании этой же задачи с таким же решением в программе MATLAB результат может оказаться положительным, то есть в случае полного совпадения полиномов знаменателя объекта и числителя компенсирующего элемента неустойчивое движение не возникнет. Однако практической ценности такой положительный результат не имеет, поскольку достижение точного равенства двух полиномов, один из которых известен лишь из экспериментальных оценок, следовательно, с ограниченной точностью, невозможно. И даже при полном совпадении этих полиномов их действие осуществляется в разных точках, поэтому результат будет соответствовать результату, получаемому в программе VisSim, то есть даже точное совпадение моделей не даст устойчивого решения. Неустойчивость может проявиться в конце переходного процесса и при моделировании за малое время никак не проявиться.

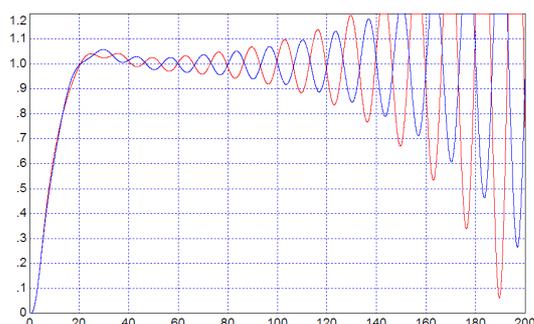


Рис. 12. Переходные процессы в системе при отличии одного коэффициента компенсирующего элемента на 0,5 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, предложенная модификация целевых функций позволяет успешно вычислять коэффициенты регулятора методом численной оптимизации в программе VisSim. Данная работа продолжает и пополняет результаты исследований авторского коллектива в данном направлении [3–5].

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки по проекту «Исследование предельных точностей оптических методов измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка новых робототехнических и электромеханических систем», Темплан, проект № 7.559.2011, НИР № 01201255056.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ziegler, J.G and Nichols, N.B. Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME 64, 1942, pp. 759-768.

[2] Zavorin A.N. et al. The modification of the quality characteristics of system of control with feedback by the using of PI^2D^2 -regulators. Collection of science works of NSTU. 2010. 4(62). P.41 – 50. (In Russian: Заворин А.Н., Ядрышников О.Д., Жмудь В.А. Усовершенствование качественных характеристик систем управления с обратной связью при использовании PI^2D^2 -регулятора. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2010. 4 (62). С.41–50).

[3] Voevoda A.A. et al. Comparative analysis of the optimization methods with the use of programs MATLAB and VisSim. Mechatronics, automation and control. 2012. 9. 37–43. (In Russian: ., А.Н. Заворин, О.Д. Ядрышников. Сравнительный анализ методов оптимизации регуляторов с использованием программных средств VisSim и MATLAB // Мехатроника, автоматизация и управление. № 9, 2012. с. 37–43)

[4] Poller B.V. et al. The design of robust regulator with the method of double iterative numerical optimization. Science Bulletin of NSTU. 2012. 2. P. 196–200. (In Russian: Синтез робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации / Б. В. Поллер, В. А. Жмудь, С. П. Новицкий, А. Н. Заворин, О. Д. Ядрышников // Научный вестник НГТУ. - 2012. - № 2 . С 196–200).

[5] Zhmud V.A. et al. The method of the designing of adaptive control systems for the controlling of non-stationary object with delay. Science Bulletin of NSTU. 2012. 3. (In Russian: Метод проектирования адаптивных систем для управления нестационарными объектами с запаздыванием. / В. А. Жмудь, А.Н. Заворин, Полищук А.В., О. Д. Ядрышников // Научный вестник НГТУ. 2012. №3).



Вадим Жмуд – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор 200 научных статей., главный научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, измерительная техника.

E-mail: oao_nips@bk.ru



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

E-mail: oleg_yadr@mail.ru

Дробно-степенные ПИД-регуляторы и пути их упрощения с повышением эффективности управления

Вадим Жмудь^{1,2}, Александр Заворин²

¹Новосибирский государственный университет, Новосибирск, Россия

²Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

oaonips@bk.ru

Аннотация. Исследуется возможность достижения более простым регулятором соизмеримых или лучших результатов в сравнении с известным изощренным методом синтеза ПИД^λД^μ-регуляторов, более сложных, чем широко известные и повсеместно применяемые ПИД-регуляторы. В результате продемонстрирована возможность достижения лучших результатов более простым путем²

Ключевые слова: численная оптимизация, регуляторы, автоматика, моделирование, динамика систем, точность управления

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ЕЕ РЕШЕНИЯ

Управление динамическими объектами в замкнутом контуре применяется во всех отраслях науки и техники, при этом наибольшее распространение получили регуляторы, содержащие пропорциональный, дифференцирующий и интегрирующий тракт, называемые ПИД-регуляторами. Множество авторов предпринимали попытки модифицирования структур ПИД-регуляторов в расчете на новизну, обоснованную лучшей эффективностью. Одно из таких направлений состоит в использовании нецелого показателя степени в дифференциальном уравнении регулятора, что соответствует неполному интегрированию и (или) дифференцированию [1–6]. Суть так называемого регулятора с дробным порядком интегрирования и (или) дифференцирования (ПИД^λД^μ-регулятора) заключается в двух шагах: а) утверждается и показывается на примерах, что использование нецелой степени интегрирования и (или) дифференцирования дает положительный эффект (по крайней мере, в ряде задач); б) утверждается, что в рамках наперед заданной точности регулятор по предыдущему пункту может быть реализован в структуре, использующей лишь целую степень интегрирования и дифференцирования. Даны рекомендации по такой аппроксимации.

Такое решение делает актуальным решение

² Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

ряда вопросов.

1. Поскольку аппроксимация тем точнее, чем сложнее регулятор, следует определить, какой погрешностью точности достаточно при этом ограничиться, то есть какая сложность регулятора достаточна.

2. Насколько оправданы выводы по результатам сравнения эффективности сложных структур регуляторов с эффективностью ПИД-регуляторов? Может оказаться, что численная оптимизация параметров этих сложных структур обеспечить лучшие регуляторы, чем метод, основанный на приблизительной реализации фрактальных регуляторов.

3. Нельзя ли упростить указанные сложные структуры не на основе критерия малой погрешности аппроксимации, а на основе критерия достижения целей синтеза регулятора?

Действительно, предлагаемые регуляторы содержат сложные структуры, число числовых параметров в которых варьируется от 6 до 12 и более. ПИД-регуляторы содержат лишь три численных параметра. Если введение дополнительных структур с новыми параметрами позволяет обеспечить лучшее качество управления, то имеются основания предполагать, что последовательное увеличение числа параметров регулятора от 3 до 6 в некоторых структурах может позволить постепенно увеличивать качество регулятора и расширять его возможности при движении от регулятора с тремя параметрами к регулятору, например, с десятью параметрами.

1. ФОРМИРОВАНИЕ ПИД^λД^μ-РЕГУЛЯТОРА

ПИД^λД^μ-регулятор предлагается формировать в форме аппроксимации рациональной передаточной функцией [3–4] в виде:

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s^\lambda} + T_D s^\mu \right), \quad (1)$$

где K_p коэффициент пропорционального тракта, T_I параметр звена интегрирования, T_D коэффициент дифференцирующего звена, λ порядок интегратора, такой, что $0 < \lambda < 1$, μ порядок дифференциатора, такой, что $0 < \mu < 1$, s – аргумент в преобразовании Лапласа или

символическая запись операции дифференцирования в случае использования дифференциальных уравнений. Параметры регулятора K_P , T_I , T_D в [5] предлагается определять с помощью метода Зигеля–Николса [4]. Этот выбор явно не оптимален, поскольку этот метод не самый эффективный для достижения наилучшего качества управления.

Тракт интегрирования ПИ^λД^μ-регулятора описывается в области частот следующей передаточной функцией:

$$C_I(s) = \frac{1}{s^\lambda}, \quad (2)$$

В диапазоне частот $[\omega_L, \omega_H]$, дробно-степенной интегратор может быть смоделирован функцией, представленной следующим образом:

$$C_I(s) = \frac{K_I}{\left(1 + \frac{s}{\omega_c}\right)^\lambda}, \quad (3)$$

так как при больших частотах единицей в знаменателе (3) можно пренебречь:

$$C_I(s) = \frac{K_I}{\left(\frac{s}{\omega_c}\right)^\lambda} = \frac{1}{s^\lambda}, \quad (4)$$

$K_I = (1/\omega_c)^\lambda$ и ω_c является угловой частотой среза, таким образом, что $\omega_c = 0.1\omega_L$.

В [5] предлагается далее аппроксимация дробно-степенного интегратора (4) в диапазоне частот $[\omega_L, \omega_H]$ рациональной функцией следующего вида:

$$C_I(s) = \frac{1}{s^\lambda} \approx K_I \frac{\prod_{i=0}^{N-1} (1 + s/z_i)}{\prod_{i=0}^N (1 + s/p_i)}. \quad (5)$$

Для вычисления параметров аппроксимации в [5] предлагается методика.

II. ДЕМОНСТРАЦИОННЫЙ ПРИМЕР

II. 1. Задача и ее решение описанным методом

Чтобы продемонстрировать применение предложенного подхода, рассмотрим традиционную структуру системы управления с обратной связью. Объект управления представляется передаточной функцией:

$$W_o(s) = \frac{1}{s(1+2s)} e^{-s}. \quad (6)$$

Регулятор $C(s)$ формируется в виде (1). Сначала параметры λ и μ принимаются равными 1, что означает, что ПИ^λД^μ-регулятор принимает вид классического ПИД-регулятора. Применяя настраивающий метод Зигеля–Николса, находим параметры классического

ПИД-регулятора K_P , T_I и T_D , а именно: $K_P = 0.444$, $T_I = 6.0$, $T_D = 1.5$. Используем эти же коэффициенты для обобщенного ПИ^λД^μ-регулятора, получим:

$$C(s) = 0,444\left(1 + \frac{1}{6s^\lambda} + 1,5s^\mu\right). \quad (7)$$

Параметры ПИ^λД^μ-регулятора λ и μ взяты из статьи [5] и равны соответственно 0.06 и 0.95:

$$C(s) = 0,444\left(1 + \frac{1}{6s^{0,06}} + 1,5s^{0,95}\right). \quad (8)$$

Рациональное приближение функции иррационального ПИ^λД^μ-регулятора дается соотношением:

$$C(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_I s^\lambda} + T_D s^\mu\right) \approx K_P \left(1 + \frac{K_I \prod_{i=0}^{N_I-1} (1 + s/z_{Ii})}{T_I \prod_{i=0}^{N_I} (1 + s/p_{Ii})} + T_D K_D \frac{\prod_{i=0}^{N_D} (1 + s/z_{Di})}{\prod_{i=0}^{N_D} (1 + s/p_{Di})}\right). \quad (9)$$

Здесь $K_P = 0,444$; $K_I/T_I = 0,2335$; $K_D T_D = 0,007$; $z_{Ii} = 0,0182(21,3676)^i$; $p_{Ii} = 0,0152(21,3676)^i$; $z_{Di} = 0,0048(1438,4498)^i$; $p_{Di} = 4,3308(1438,4498)^i$.

На *рис. 1* показана реакция системы управления с обратной связью, когда $C(s)$ является классическим ПИД-регулятором и когда $C(s)$ является ПИ^λД^μ-регулятором в его рациональной форме. На *рис. 2* приведены графики статической ошибки (отсчет начат через 50 с после начала процесса). На *рис. 3* приведена структура для моделирования регулятора по соотношению (9), а на *рис. 4* – соответствующие переходные процессы при единичном ступенчатом скачке задания. При этом на *рис. 3* и 4 верхней структуре и процессу с наибольшим перерегулированием (более 50%) соответствует система с ПИД-регулятором ($\mu = \lambda = 1$), средней структуре и процессу со средним перерегулированием (менее 20%) соответствует система с регулятором по уравнению (9). Нижняя структура и график с наименьшим перерегулированием но наиболее медленно затухающей ошибкой иллюстрирует ПИД-регулятор, в дифференцирующий тракт которого введена передаточная функция с параметрами, найденными эмпирическим путем.

II. 2. Исследование возможностей альтернативного метода синтеза регулятора

Как можно увидеть из рассмотренного примера, рациональная форма ПИ^λД^μ-регулятора имеет очень сложную структуру.

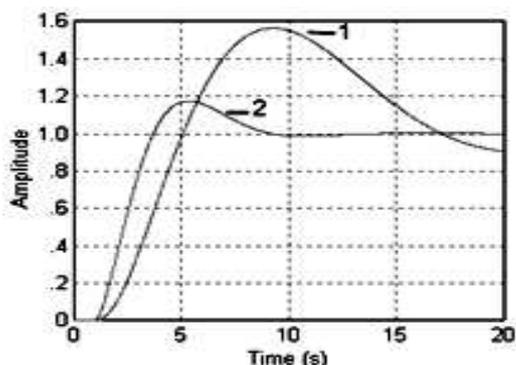


Рис. 1. Реакция системы управления на единичное входное воздействие с классическим ПИД-регулятором (1) и ПИ^λД^μ-регулятором в его рациональной форме (2)

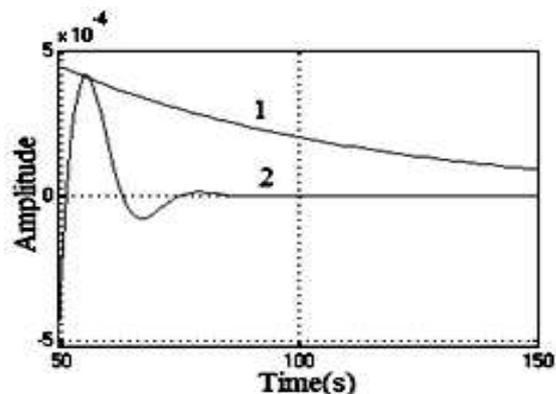


Рис. 2. Остаточная статическая ошибка (через 50 с) системы с классическим ПИД-регулятором (2) и ПИ^λД^μ-регулятором в его рациональной форме (9)

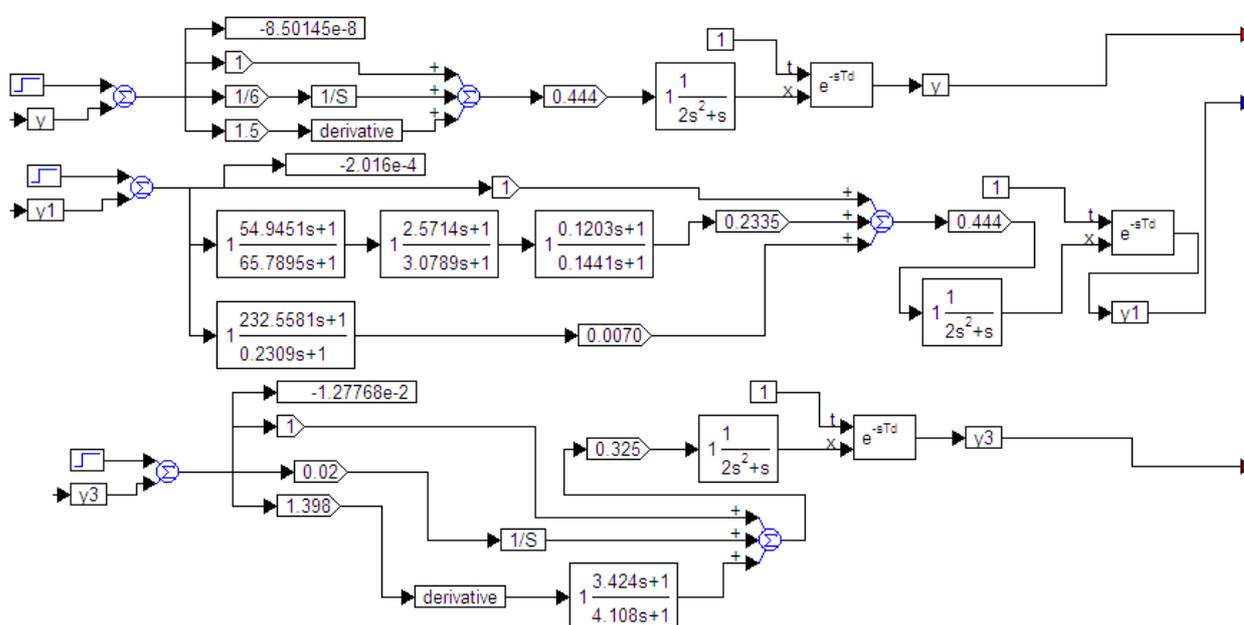


Рис. 3 Структура для моделирования регулятора по соотношению (9) при моделировании в VisSim

Можно предположить, что между сложной структурой вида (9) и простейшей структурой, в которую переходит структура (9) при $\mu = \lambda = 1$, существуют промежуточные по сложности формы регулятора, позволяющие получить качество регулирования лучше, чем с ПИД-регулятором, пусть даже будет хуже, чем с регулятором (9).

Если же с этими промежуточными структурами получится достигнуть соизмеримого или лучшего качества, чем со структурами вида (9), то результат по всем параметрам превзойдет результат, получаемый методом, предлагаемым в анализируемой серии статей. Обоснованность надежд на лучшие результаты состоит в том, что в проанализированной методике коэффициенты регулятора рассчитываются по далеко не идеальной методике и реализуется приблизительно.

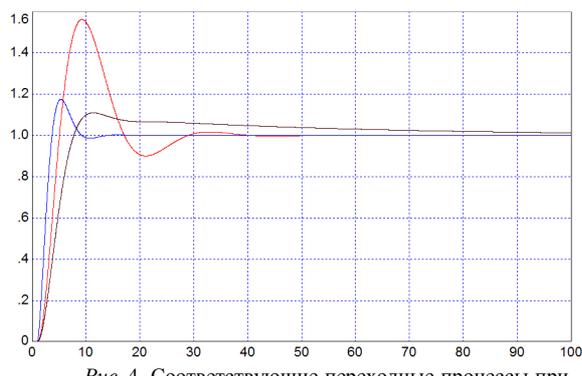


Рис. 4. Соответствующие переходные процессы при единичном ступенчатом скачке задания в структуре по рис. 3

На рис. 5 показана схема моделирования системы по уравнению (9). Модельный анализ показал, что тракт, содержащий три последовательно включенные передаточные функции (средний на рис. 5), не оказывает существенного влияния на свойства системы, причем его наличие увеличивает

перерегулирование вдвое. Эта ситуация совершенно естественна, поскольку в объекте содержится интегратор, на что указывает отсутствие свободного члена в знаменателе его передаточной функции. Это дает основание устранить этот тракт из регулятора, чем достигается существенное его упрощение без ухудшения качества системы. Поэтому альтернативный регулятор отыскивается в классе ПД-регуляторов или их модификации.

Предлагается использовать дробно-рациональный ПД-регулятор со структурой следующего вида:

$$W_R(s) = K_1 + K_2 \frac{as+1}{bs+1}. \quad (10)$$

Параметры регулятора предлагается найти методом оптимизации в приложении *VisSim5.0*. Целевую функцию зададим в виде:

$$\Psi = \int_0^T |e(t)| dt. \quad (11)$$

Рассмотрим передаточную функцию вида

$$W_2(s) = \frac{as+1}{bs+1}. \quad (12)$$

Программное обеспечение *VisSim* не позволяет напрямую оптимизировать параметры a и b , поэтому функцию (12) следует привести к виду, более удобному для оптимизации, то есть с использованием коэффициентов, которые задаются внешними параметрами

Для этой цели обозначим входной сигнал x , выходной – z , и $W_2(s) = z(s) / x(s)$. Отсюда путем несложных преобразований получим:

$$z(s) = 1/b \{ ax(s) + 1/s[-z(s) + x(s)] \}. \quad (13)$$

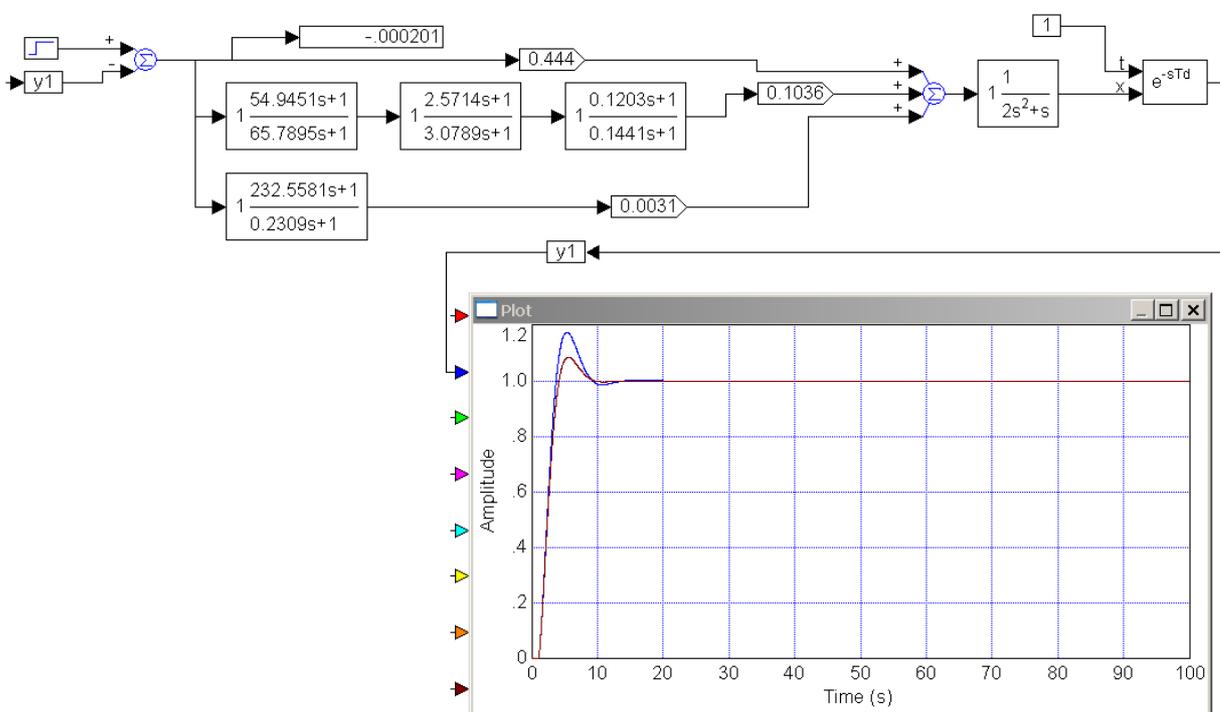


Рис. 5. Результаты моделирования, которые иллюстрируют, что средняя связь не слишком нужна, или вовсе не нужна. Процесс при наличии этой связи имеет несколько большее перерегулирование

На рис. 6 показана структура, обеспечивающая моделирование передаточной функции по уравнению (13). Для корректности деления необходимо исключить нулевое значение параметра b , что может быть обеспечено использованием ограничителя. На рис. 7 показана структура регулятора с использованием такой передаточной функции.

После того, как мы обеспечили внешнее управление коэффициентами передаточной функции, их можно оптимизировать в программе *VisSim* по критерию (11). По переходному процессу, показанному на рис. 7, видно, что он существенно лучше, чем процесс, показанный на рис. 5.

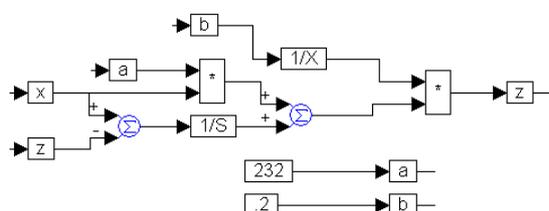


Рис. 6. Структура для моделирования передаточной функции вида (13)

А именно: перерегулирование снижено от 3–8% до 1%, установившаяся ошибка снижена от $2 \cdot 10^{-4}$ до $8,77 \cdot 10^{-15}$. Поскольку весь переходный процесс занимает около 10 с, моделирование на протяжении 100 с нецелесообразно. После уменьшения этого времени до 50 с и повторной

оптимизации получены новые численные коэффициенты регулятора, при которых установившееся значение за это половинное время принимает значение $2,56 \cdot 10^{-10}$. Этот регулятор намного проще регулятора, рассчитанного по процедуре, предложенной в [4]. Хотя теория позволяет предсказать

отсутствие потребности в интегрирующем тракте, этот вопрос можно исследовать путем численной оптимизации. С этой целью достаточно добавить интегральный тракт и структуру для оптимизации его коэффициента, как показано на рис. 8.

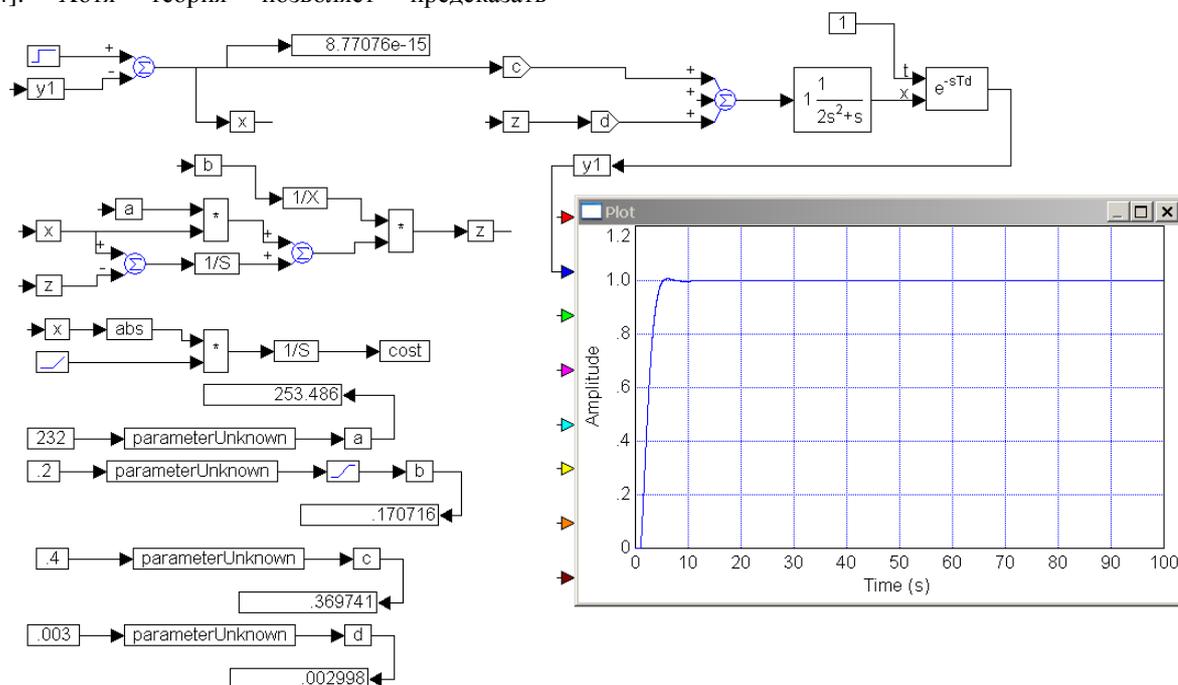


Рис. 7. Структура для оптимизации параметров регулятора и полученный результат

На рис. 9 показаны результаты оптимизации регулятора: окончательные значения коэффициентов записаны в блоках числовых

мониторов на выходах оптимизируемых переменных.

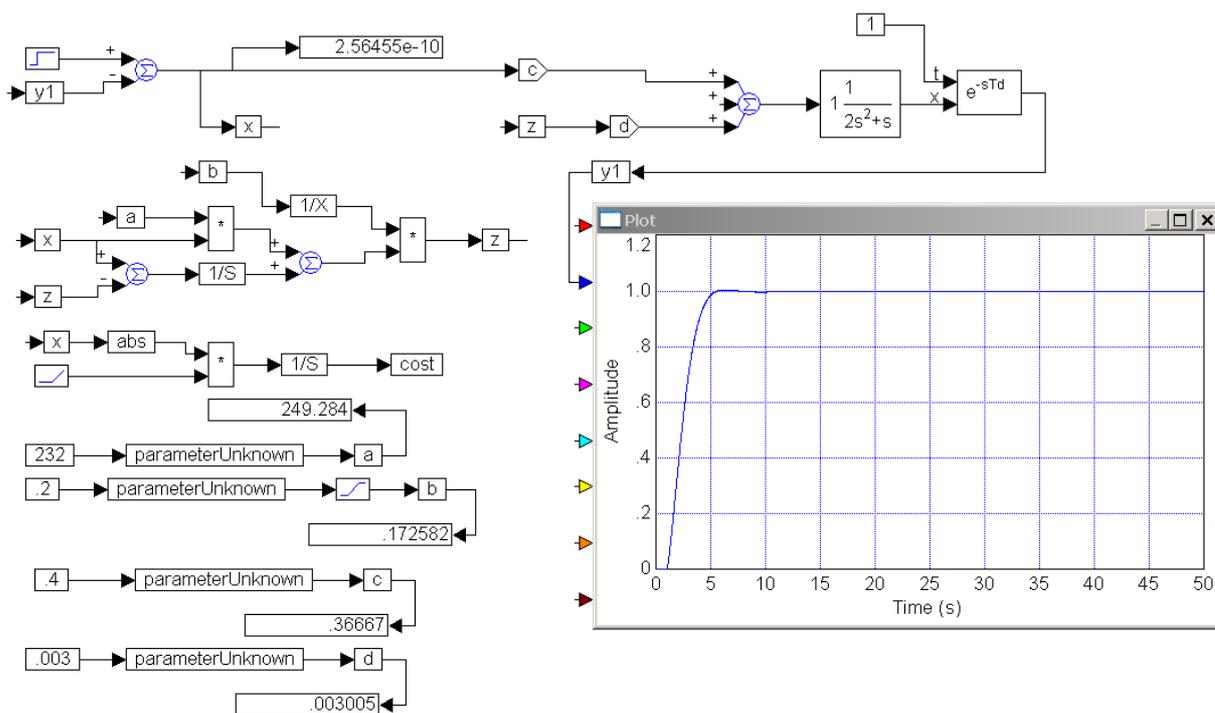


Рис. 8. То же при уменьшении времени интегрирования вдвое

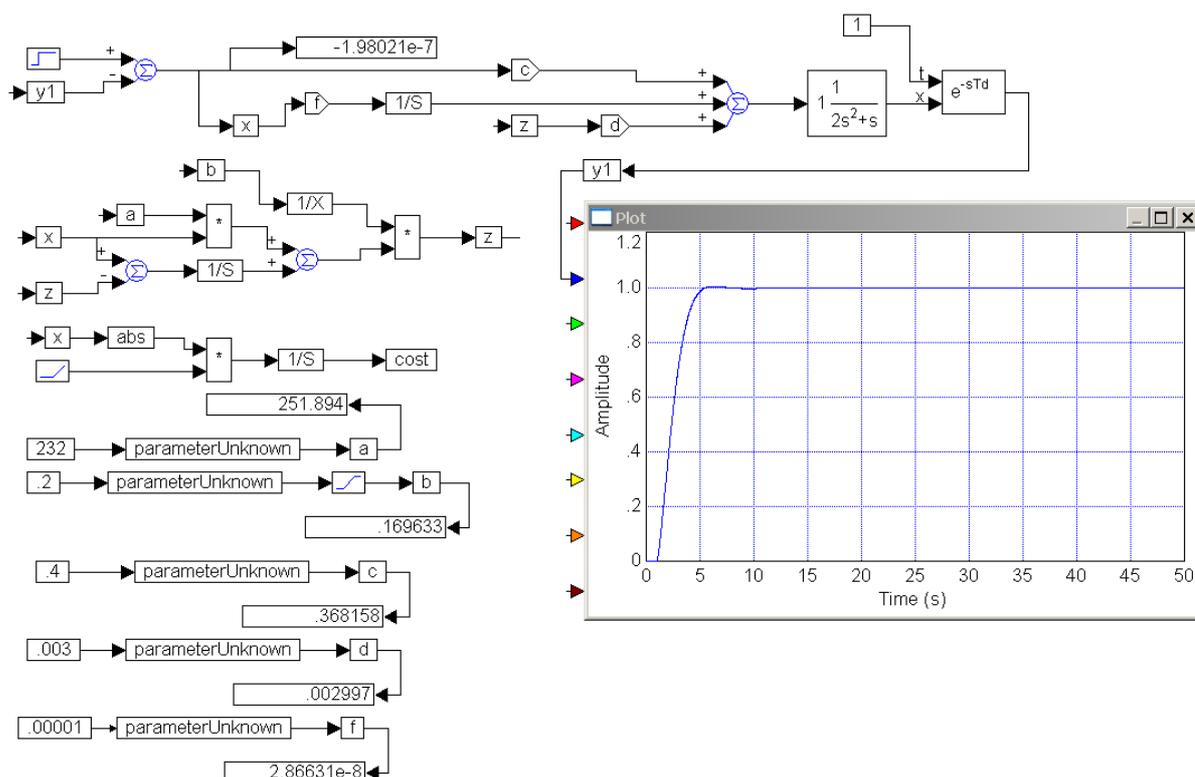


Рис. 9. То же, что на рис. 8, с введением интегратора

Результирующий коэффициент интегрального тракта (обозначен переменной f) чрезвычайно мал: $K_1 = 2,866 \cdot 10^{-8}$. Признаком того, что интегратор в регуляторе с данным объектом не требуется, содержится и в изменении целевой функции: после его введения она изменилась не существенно, от 0,172 до 0,169.

По результатам оптимизации можно рекомендовать регулятор, который рассчитан в структуре, показанной на рис. 9, но его реализация может быть осуществлена в более простой структуре, поскольку уравнения (13) описывает передаточную функцию из уравнения (10).

Результат синтеза регулятора, таким образом, дается следующим уравнением (10), где $K_1 = 0.368$; $K_2 = 0.003$; $a = 252$; $b = 0.17$ (значения, рассчитанные в структуре рис. 11, округлены). Полученный результат можно еще упростить, приведя слагаемые к общему знаменателю и осуществив сложение. По виду переходных процессов и по формальным показателям (перерегулирование, установившаяся ошибка) Видно, что указанный регулятор намного проще и намного эффективнее, чем регулятор, предложенный в статье [4].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, моделирование и численная оптимизация продемонстрировали, что этим путем можно синтезировать более простые регуляторы, обеспечивающие лучшую точность и более качественные переходные процессы

(следовательно, и лучшую динамическую точность), чем регуляторы, предложенные в работе [4]. В итоге достигнуто как упрощение регулятора, так и его улучшение. Примененная методика апробирована и ранее на многих других задачах синтеза, хотя демонстрация ее эффективности не всегда была столь наглядна [7–9].

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Chen, Y.Q., Vinagre, B.M. and Monje, C.A.* A Proposition for the Implementation of Non-integer PI Controllers. The Thematic Action 'Systems with Non-integer Derivations' LAP-ENSEIRB, Bordeaux, France, 2003.

[2] *Leu, J.F., Tsay, S.Y. and Hwang, C.* Design of Optimal Fractional Order PID Controllers. Journal of the Chinese Institute of Chemical Engineers 33:2, 2002.

[3] *Podlubny, I.* Fractional Order Systems and $PI^{\lambda}D^{\mu}$ Controllers. IEEE Transactions on Automatic Control 44:1, 1999, pp. 208-214.

[4] *Bettoua, K. and Charef, A.* Control quality enhancement using fractional $PI^{\lambda}D^{\mu}$ controller. International Journal of Systems Science Vol. 40, No. 8, 2009, pp. 875-888.

[5] *Ziegler, J.G and Nichols, N.B.* Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME 64, 1942, pp. 759-768.

[6] *Заворин А.Н., Ядрышников О.Д., Жмудь В.А.* Усовершенствование качественных характеристик систем управления с обратной связью при использовании PI^2D^2 -регулятора. Сборник научных трудов НГТУ. Новосибирск. 2010. 4 (62). С.41 – 50.

[7] *Воевода А.А., Жмудь В.А., А.Н. Заворин, О.Д. Ядрышников.* Сравнительный анализ методов оптимизации регуляторов с использованием программных средств VisSim и MATLAB //

Мехатроника, автоматизация и управление. № 9, 2012. с. 37 – 43.

[8] Синтез робастного регулятора методом двойной итеративной параллельной численной оптимизации / *Б. В. Поллер, В. А. Жмудь, С. П. Новицкий, А. Н. Заворин, О. Д. Ядрышников* // Научный вестник НГТУ. - 2012. - № 2. - С 196 -200.

[9] Метод проектирования адаптивных систем для управления нестационарными объектами с запаздыванием. / *В. А. Жмудь, А.Н. Заворин, Полищук А.В., О. Д. Ядрышников* // Научный вестник НГТУ. - 2012. - №3.



Вадим Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики в НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор 200 научных статей., главный научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, измерительная техника.

E-mail: oao_nips@bk.ru



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

E-mail: pisatel1987@mail.ru

Программное обеспечение для лазерного измерителя деформаций земной коры

Д.О. Терешкин

ФГБОУ ВПО НГТУ, Институт лазерной физики СО РАН, Новосибирск

Аннотация: В статье рассматриваются основные задачи, стоящие перед программным обеспечением для обработки сигналов лазерного измерителя, применяемого для измерений деформаций земной коры, а также результаты их решения.³

Ключевые слова: программное обеспечение, деформации земной коры, предвестники землетрясений, измерения перемещений, измерения сдвигов

ВВЕДЕНИЕ

Измерения деформаций земной коры используются для обнаружения предвестников землетрясений, а также в иных исследовательских целях. Разработанный Институтом лазерной физики СО РАН совместно с Опытно-методологической лазерной экспедицией СО РАН измеритель деформаций земной коры (деформограф) имеет несколько версий, которые непрерывно совершенствуются с целью повышения функциональных свойств, надежности, достоверности и так далее. В данной статье описываются модификации программных средств для этого устройства.

1. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ СИСТЕМЫ

Общая схема аппаратной части измерителя деформаций (деформографа) приведена на рисунке 1. В целом, измерительно-управляющая система состоит из: фотодетекторов, частотно-фазовой системы автоподстройки частоты (ЧФАП), измерителя фазового сдвига (ИФС), модуля GPS и компьютера. ЧФАП управляет пьезоэлектрическим модулятором длины лазера (для изменения его частоты), установленной на гетеродинном лазере, поддерживая разность частот излучения этого лазера и зондирующего лазера. С оптической части на фотодетекторы поступают сигналы опорного плеча, измерительных плеч и компенсационного плеча.

Сигналы с фотодетекторов поступают на входы блока ИФС, всего входов шесть, при измерении часть из них выбирается в качестве опорных, относительно которых вычисляется сдвиг фаз остальных каналов. Полученный

поток измерений сохраняется на внутреннем накопителе ИФС, которые могут быть получены по запросу.

Имеется также возможность передачи данных в реальном времени. Передача происходит по линии *Ethernet*, на стандартных протоколах, реализованных поверх стека *TCP/IP* [1]. Это сделано из следующих соображений:

1. Использование *Ethernet* дает возможность объединения устройства в локальную сеть с идентичными или похожими устройствами. Такое объединение может быть продиктовано необходимостью размещения дополнительных регистраторов сейсмических сигналов, оцифровывающих сигналы акселерометров или велосиметров, для получения более полной информации о сейсмической обстановке местности. При этом для построения локальной сети может быть использовано стандартное легкодоступное оборудование.

2. Использование стандартных протоколов дает возможность работать с устройством с помощью 3rd-party ПО. Это необходимо для того, чтобы пользователь имел возможность бесшовной интеграции системы в свои процессы.

Данные могут быть получены по протоколу *Seedlink*, с помощью системы *SeisComp* [2], а также по протоколу *FTP*, в виде файлов *miniseed*. Помимо этого, для взаимодействия сервер-ИФС был разработан и реализован специальный протокол, который также позволяет получить поток данных в реальном времени и считывать записанные файлы. Кроме того, блок ИФС предоставляет *telnet*-интерфейс для удалённого мониторинга состояния системы, управления установками регистрации и управления процессом регистрации.

Управляющий сервер на компьютере запрашивает данные, проводит их предобработку и анализ критериев *STA/LTA* [3]. После этого данные сохраняются на жесткий диск, при этом они могут как сохраняться в неизменном виде – в виде *miniseed*-блоков, так и могут быть перекодированы в формат *XX*, совместимый с сейсмостанциями “Байкал”. Сервер имеет возможность получения потоков данных одновременно с нескольких устройств.

Для визуализации поступающих данных в реальном времени создана специальная программа визуализации, запрашивающая данные у управляющего сервера по разработанному протоколу. Она отображает выбранные

³ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

потоки данных с одного или нескольких узлов, а также дает возможность управления дополнительным пьезоэлектрическим модуля-

тором ЧФАП и мониторинга уровня сигналов фотодетекторов.

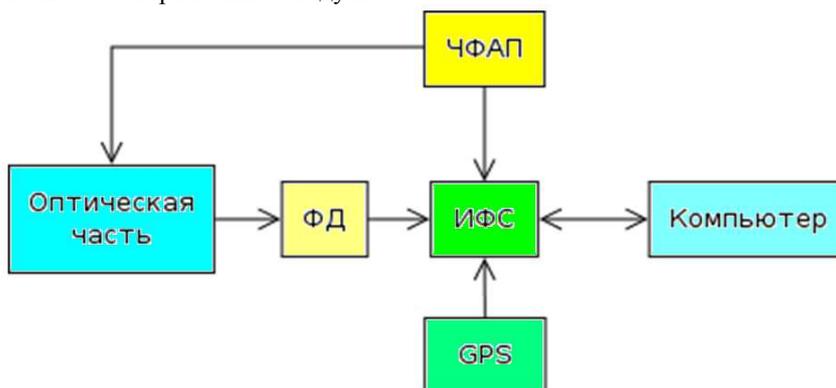


Рис. 1. Схема аппаратной части измерителя деформаций

2. АППАРАТНАЯ АРХИТЕКТУРА ИФС

Конструктивно ИФС состоит из двух плат – платы формирователей фазовых интервалов (ФФИ) и процессорной платы, содержащей программируемую вентильную матрицу (FPGA) (см. рис. 2). Сигналы с фотодетекторов поступают на входы ИФС, которые соединены с платой ФФИ. ФФИ преобразовывают входные синусоидальные сигналы в импульсную форму – меандры с уровнями КМОП-логики. Преобразованные сигналы передаются на вход FPGA, в котором производится измерение разности фаз между заданными каналами и привязка потока получаемых данных ко времени.

Временная привязка осуществляется с помощью цифрового синтезатора частоты,

опорной частотой для которого служит локально установленный на плате ИФС термостатированный генератор, управляемый напряжением. Контроллер периодически синхронизирует подсистему времени с внешним источником времени - GPS. Из-за требования возможности развертывания системы в шахтах, штольнях и прочих местах, где нет возможности для уверенного приёма сигналов GPS, синхронизация происходит с помощью сигналов от выносного модуля GPS, который находится в зоне видимости спутников. ИФС связан с модулем GPS с помощью витой пары. Связь между ними производится по стандарту RS-485. Длина линии может достигать не более 500 м. Сам модуль посылает по линии раз в секунду посылки, характеризующие состояние приема сигналов GPS, текущее время и координаты.

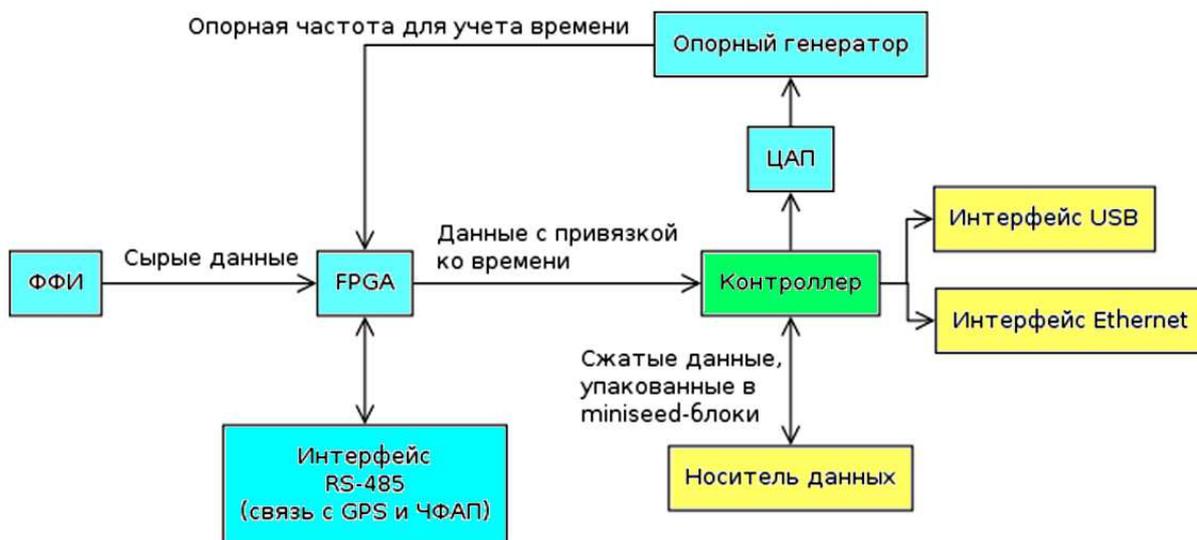


Рис. 2. Схема измерителя фазового сдвига

Данные из FPGA передаются в контроллер, где они сжимаются и сохраняются на внутренний носитель. В качестве носителя выступает MicroSDHC/SDXC-карта, работающая по стандартному SD-интерфейсу [4].

Контроллер обслуживает входящие запросы по интерфейсам USB и Ethernet. Запросы бывают двух типов – запросы статуса и запросы потока данных. В первом случае контроллер отправляет необходимую информацию непосредственно

после получения запроса, в случае же запроса потока данных контроллер инициирует передачу данных и отправляет их по мере их появления, таким образом, осуществляя передачу в реальном времени.

Также контроллер подключен к системе управления ЧФАП по интерфейсу RS-232/485. Это необходимо для мониторинга статуса захвата ЧФАП, а также для управления напряжением на дополнительном пьезоэлектрическом модуляторе (ПЭМ).

ОБЩИЙ ПРИНЦИП ИЗМЕРЕНИЯ СДВИГА ФАЗ

Гармонические входные сигналы поступают на вход одного из шести формирователей, где преобразуются в меандры, с уровнями КМОП-логики. Перед переводом сигналов в импульсную форму, они пропускаются через усилитель, фильтрующий частоты, лежащие вне диапазона 0,7 – 1,2 МГц. Основой каждого формирователя служат два компаратора, один из которых переключается по переходам входного сигнала через нуль, а второй при превышении значения регулируемого порога гистерезиса. Меандры с первого компаратора используются собственно как измерительные для формирования фазовых интервалов в ФФИ, а сигналы со второго используются для определения амплитуды сигнала.

Сигналы с формирователей приходят в мультиплексор. В соответствии с конфигурацией, для каждого выходного канала мультиплексора один из входных каналов выбирается как опорный, а другой как измеряемый. Всего выходных каналов шесть, таким образом, на вход ИФС подается шесть пар сигналов, между которыми измеряется фазовый сдвиг.

Для устранения погрешности измерений формируются фазовые интервалы отдельно по фронтам и отдельно по срезам входных сигналов. Количество импульсов тактовой частоты, прошедших за время фазовых интервалов сформированных по фронтам (N_1) и срезам (N_2), складываются. Результат:

$$N = N_1 + N_2, N_1 = \sum_{i=1}^k N_{\phi i}, N_2 = \sum_{i=1}^k N_{ci} \quad (1)$$

Интервал измерения выбирается следующим образом. Фронт фазового интервала даёт старт измерению. После принятия заданного количества T тактовых импульсов частоты заполнения, схема переходит в режим ожидания $\Phi_{\text{кон}}$. Каждый интервал, таким образом, будет отличаться от $T \cdot T_{\text{зап}}$, на некоторое количество периодов d , зависящее от времени ожидания фронта $\Phi_{\text{кон}}$. Следовательно, интервал измерения будет равен:

$$M = T + \delta. \quad (2)$$

Теперь, для того чтобы получить значение разности фаз, нужно вычислить:

$$\Phi = \pi \frac{N}{M} \quad (3)$$

Т.к. отношение $\delta/T \ll 1$, выражение для Φ можно переписать в следующем виде:

$$\Phi = \pi \frac{N}{T} \frac{1}{1 + \frac{\delta}{T}} \approx \pi \frac{N}{T} \left(1 - \frac{\delta}{T} \right) \quad (4)$$

Из соображений удобства вычислений и быстродействия, T следует выбирать равным двум в целой степени. Это позволяет избавиться от деления при вычислении Φ , заменив его двоичным побитовым сдвигом.

Полученный код пропорционален разности фаз, которой считается среднее арифметическое разностей фаз измеренных по фронтам и по срезам входных сигналов. Это наиболее верная интерпретация значения $\Delta\Phi$ для импульсных сигналов, так как вследствие ненулевого напряжения смещения компараторов и возможного искажения формы входных гармонических сигналов, скважность импульсных сигналов может незначительно отличаться от 2. Для уменьшения абсолютной погрешности измерений были использованы логические элементы с малым временем задержки распространения и схемные решения, позволяющие уменьшить или нейтрализовать задержку сигналов в ключевых узлах измерителя.

В процессе регистрации важно иметь данные об амплитуде сигналов, хотя бы на качественном уровне: во-первых, это необходимо для того, чтобы оператор мог предпринять соответствующие действия в случае ухудшения силы сигнала, например, в случае запотевания зеркал. Во-вторых, система должна браковать те измерения, которые были сделаны при низкой амплитуде сигнала, иначе измерения могут дать некорректные результаты. Наиболее простой способ измерять амплитуды сигналов – это добавить на каждый канал по АЦП, однако это слишком сильно усложнило бы схему. Другой способ – поставить один АЦП и подключить его вход к мультиплексору, на входы которого заведены сигналы с фотодетекторов. Этот метод также был отвергнут из-за того, что переключение мультиплексора дает помехи. Измерение амплитуды сигналов в данной системе сделано следующим образом: как было сказано выше, формирователь формирует для каждого канала два импульса – один с помощью компаратора без гистерезиса, другой с помощью компаратора с известным, наперёд заданным гистерезисом.

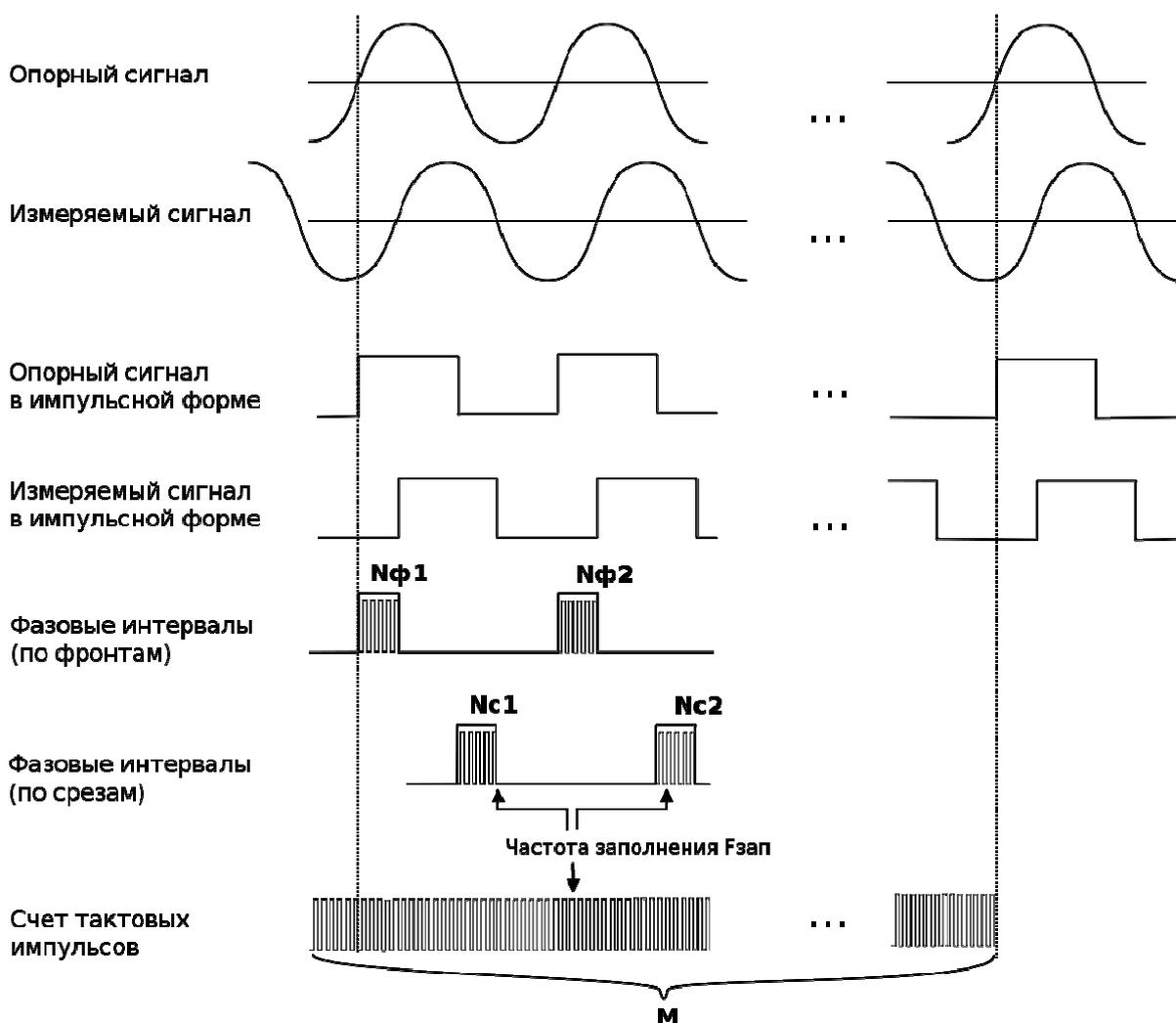


Рис. 3. Принцип счета фазового сдвига

Сдвиг фазы между этими импульсами:

$$\Delta = \arcsin\left(\frac{d}{A}\right) = N - c$$

где d – уровень гистерезиса, N – количество импульсов частоты заполнения между фронтами импульсов, c – некоторая константа, связанная с тем, что у первого компаратора имеется гистерезис. Во всей интересующей нас области выполняется:

$$d \ll A$$

таким образом:

$$A = \frac{d}{N - c}$$

что эквивалентно с точностью до переобозначений:

$$A = \frac{k}{N} - b$$

Коэффициенты k и b легко калибруются по двум точкам характеристики. Таким образом, измеряя количество импульсов частоты заполнения между фронтами соответствующих сигналов можно получить амплитуду входной синусоиды.

ПОДСИСТЕМА ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ И ВРЕМЕННАЯ ПРИВЯЗКА ДАННЫХ

При записи данных неизбежно возникает проблема синхронизации. Суть данной проблемы заключается в необходимости сопоставления каждому отсчету времени, в которое он был зарегистрирован, т.е. привязать получаемые данные к шкале UTC [5, 6]. При решении этой проблемы необходимо решить следующие вопросы:

1. Источник абсолютного времени. Необходим некоторый объект, который в известный момент времени может сообщить текущее время с приемлемой точностью.
2. Алгоритмы подстройки. При обнаружении рассинхронизации времени системы с UTC, необходимы методы плавной коррекции частоты системных часов с целью устранения рассинхронизации.

Для получения абсолютного времени существует лишь два хорошо исследованных способа:

1. Синхронизация по TCP/IP с помощью протоколов NTP/PTP [7].
2. Синхронизация с помощью глобальных спутниковых систем.

Не останавливаясь подробно на первом варианте, следует отметить, что при его использовании система должна получать время с генератора сигналов времени, называемого *Master clock*, который все равно необходимо синхронизовать. Кроме того, при синхронизации по протоколу *NTP* точность невелика: ошибка может достигать порядка нескольких миллисекунд. Синхронизация же по протоколу *PTP* требует специальной аппаратной поддержки, как в *Ethernet*-коммутаторах, так и в самом устройстве. С другой стороны, синхронизация с помощью *GPS*/Глонасс может быть произведена в любом месте, находящемся в зоне видимости спутников. Этот вариант и использован в данной системе.

В качестве источника времени используется синтезатор частоты, опорная частота которого генерируется генератором, управляемым напряжением, периодически синхронизуемый с *GPS*. *GPS*-модуль вырабатывает сигнал *PPS* (*pulse-per-second*), передний фронт которого привязан к секунде с некоторой, достаточно высокой точностью (около 100 нс), при первичной синхронизации по этому сигналу в регистр фазы синтезатора частоты загружается нулевое значение, а в счетчик секунд – текущее время.

Поскольку часто не имеется возможности развернуть систему непосредственно в зоне видимости спутников (например, система может быть установлена в шахте), синхронизация происходит с помощью выносного модуля *GPS*. Этот модуль устанавливается в зоне приема сигнала *GPS* и сначала синхронизируется сам, после чего начинает посылать посылки с информацией о времени раз в секунду. Модуль начинает отправлять сообщение по сигналу *PPS*, но из-за того, что посылка имеет ненулевую длину и задержки распространения

сигнала в кабеле, сигнал приходит с задержкой, которую необходимо учитывать. Это делается загрузкой в регистр фазы синтезатора предустановленного значения, вычисляемого с учетом всех задержек на этапе развертывания системы.

Как уже было сказано выше, основой подсистемы точного времени является цифровой синтезатор частоты, выполненный в виде модуля *FPGA* и генератор опорной частоты, управляемый напряжением. При инициализации, контроллер записывает в *FPGA* значения инкремента фазы (*ADDER*) и частоты синтезатора *NTICKS*. По положительному фронту тактового сигнала генератора, аккумулятор фазы синтезатора увеличивается на величину регистра инкремента фазы. При переполнении аккумулятора, счетчик тиков инкрементируется. Когда он становится равен значению *NTICKS*, он сбрасывается, счетчик секунд инкрементируется и в поток данных вставляется метка секунды. Таким образом, время системы задается 32-битным счетчиком секунд, 16-битным счетчиком тиков и фазой синтезатора. Для удобства, время представляется в виде 64-битного значения (см. рис. 4): номер секунды и 32-разрядный регистр, старшие 16 бит которого содержат значение счетчика тиков, а в младшие 16 бит отображены старшие 16 бит аккумулятора.

Кроме простого подсчета времени, необходима также синхронизация с *UTC*, т.е. в счетчик секунд должно быть записано количество секунд с начала какого-либо момента, называемого *epoch*, так, широко известна так называемая *unix epoch* – 1 января 1970. В описываемой системе выбран *GPS epoch* – 6 января 1980, в связи с тем, что источником синхронизации является именно *GPS*.

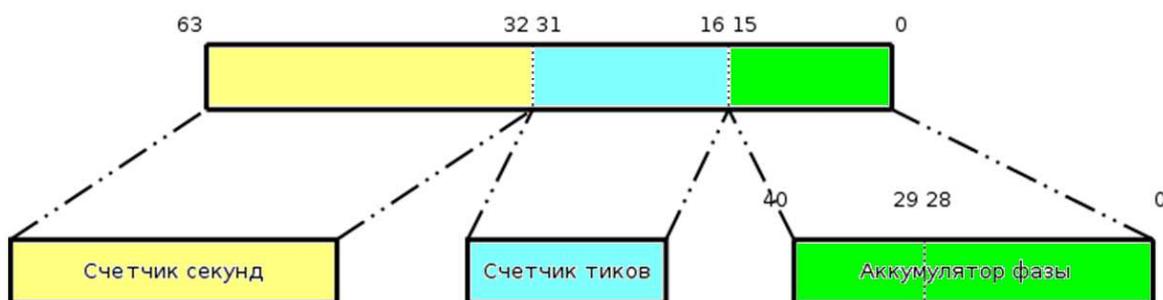


Рис. 4. Структура сигнала представления времени

Сама синхронизация выполняется следующим образом: микроконтроллер записывает в регистры управления подсистемой точного времени бит синхронизации. Если этот бит установлен, то при приходе следующего сигнала *PPS* от модуля *GPS* регистр фазы будет сброшен, таким образом синтезатор частоты будет синхронизован с *UTC* с точностью до

целого количества секунд. После этого микроконтроллеру лишь остается записать секунду, пришедшую из модуля *GPS*. По окончании данной процедуры подсистема точного времени становится синхронизированной.

Стабильность опорного генератора находится на уровне 10^{-7} , таким образом, сразу

же после синхронизации система начинает отстраиваться от точного времени. Из-за этого необходимо периодически проводить подстройку. Есть два основных пути выполнения подстройки:

1. Проводить повторную синхронизацию по истечению некоторого периода времени с прошлой синхронизации или же при уходе большем, чем некоторый заданный порог.

2. Плавно изменить частоту синтезатора, чтобы скомпенсировать уход. Это можно сделать также двумя способами:

2.1. Изменять непосредственно регистр приращения фазы.

2.2. Изменять частоту опорного генератора.

В описываемой системе выбран вариант 2.2.

Сами алгоритмы подстройки рассмотрены ниже, здесь будет описано лишь то, что сделано для этого в *FPGA*. Для плавной подстройки необходима возможность измерения расстройки.

Это сделано следующим образом: микроконтроллер записывает регистры управления подсистемой точного времени бит *CAPTURE*. Это приводит к тому, что по следующему фронту *PPS* значение младших тридцати двух бит регистра времени будет сохранено в регистре *CAPTURE*, откуда его может прочитать микроконтроллер. Так как сигнал *PPS* приходит ровно в секунду, то значение этого регистра и будет величиной

расстройки, на основании которой можно приложить соответствующее корректирующее воздействие.

СВЯЗЬ С МОДУЛЕМ GPS И СИНХРОНИЗАЦИЯ

Как уже было сказано, синхронизация с *GPS* производится не напрямую, а с помощью модуля *GPS*. Этот модуль представляет собой устройство, на плате которого расположен микроконтроллер, приемник *GPS* и драйверы линии *RS-485*. Модуль связан с ИФС посредством витой пары. Логика работы модуля следующая:

Модуль находится в одном из двух состояний:

1. *NOT_VALID* – нет точного времени: нет сигналов со спутников, блаблабла

2. *VALID* – есть сигналы со спутников, величина смещения UTC получена, точное время получено.

Каждую секунду, по фронту сигнала *PPS*, модуль отправляет сообщения, то, какие именно сообщения отправляются, зависит от состояния.

Каждое сообщение характеризуется идентификатором типа сообщения и данными. В *таблице* представлены используемые типы сообщений.

Таблица

Тип	Назначение	Формат данных
0x00	Обозначение состояния NOT_VALID	-
0x01	Пакет состояния приема сигналов GPS	TBD
0x08	Широта	IEEE754-32
0x09	Долгота	IEEE754-32
0x0a	Высота над уровнем моря	IEEE754-32
0x0f	Номер секунды GPS	Int32

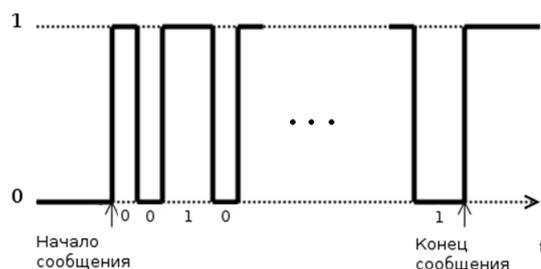


Рис. 5. Эпюры сигналов при передаче сообщения

Физически сообщения кодируются следующим образом: начало послышки начинается с переключения состояния линии в противоположное. Далее, каждый бит кодируется длиной промежутка до следующей инверсии состояния: 1 мкс – 0,2 мкс – 1. После того, как все сообщение отослано, оно

повторяется в инвертированном виде. Это сделано по двум причинам: во-первых, для контроля целостности (если повторенное сообщение после инверсии не совпадает с оригинальным, оно отбрасывается как поврежденное); во-вторых, для того, чтобы длина сообщения не зависела от содержимого. Все данные передаются старшим битом вперед, порядок байт – *big endian*.

СИСТЕМЫ

Программно система состоит из следующего ПО:

1. ПО измерителя фазового сдвига
2. Сервер сбора данных
3. Клиент визуализации данных

На *рис. 6* приведена примерная архитектура ПО измерителя фазового сдвига. Как видно, архитектура является трехслойной.



Рис. 6. Примерная архитектура программного обеспечения

АРХИТЕКТУРА НИЖНЕГО СЛОЯ ПО ИФС

Нижний слой состоит из:

1 Слоя абстракции от аппаратного обеспечения (HAL). В функции HAL входит абстрагирование от аппаратных особенностей платформы, на которой реализован ИФС.

2 Драйверов устройств. Сюда входят:

2.1 Драйвера различных накопителей, доступных контроллеру: dataflash, FRAM, SD-карты памяти.

2.2 Драйвер USB.

2.3 Драйвер ЦАП генератора.

2.4 Драйвер GPS.

3 Менеджера памяти.

ОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОСТИ HAL

HAL предоставляет унифицированные интерфейсы, который был выбран в качестве набора возможностей, общих для подавляющего большинства платформ. Общий вид интерфейса и схема его взаимодействия с реализацией и аппаратным обеспечением приведена на *рис. 7*.

Как видно из рисунка N, интерфейс HAL состоит из 6 модулей:

- Serial
- Power
- GPIO
- Systick
- Watchdog
- Debug

SERIAL

Данный модуль предоставляет унифицированный интерфейс для работы с линиями последовательной передачи данных, таких как Ethernet, USB или SPI. Для запроса списка линий и поддерживаемых ими возможностей служит функция *enumerate_lines*.

Приложение может зарегистрировать новую линию с помощью функции *register_line*, это может быть полезным для создания отдельной линии для TCP-подключения. Удалить зарегистрированную линию можно с помощью функции *unregister_line*.

По возможностям линии делятся на побайтовые, поблочные и синхронные. Побайтовые передают и получают данные по одному байту, поблочные – соответственно работают на уровне блоков. Синхронные линии обеспечивают одновременные прием и передачу, как SPI. Для работы с байтовыми линиями служат функции *set_byte_isr* и *send_byte* – первая устанавливает функцию-обработчик, которая будет вызвана обработчиком прерывания при приходе байта, вторая посылает байт по линии. Для блочных линий существуют аналогичные функции: *set_block_isr* и *send_block*, работающие уже на уровне блоков. Для работы с синхронными линиями существует функция *sync_io*, которая принимает в качестве аргументов указатели на входной и выходной буфер (которые могут совпадать). Функция *is_busy* возвращает истинное значение в случае, если линия занята и ложное в обратном случае. Функция *ioctl* служит для *line-specific* запросов.

POWER

Данный модуль служит для управления частотами тактовых сигналов периферии и мастер-частотой. Этот модуль также используется реализацией модуля *Serial* при инициализации линий. Каждый тактовый сигнал характеризуется числовым идентификатором. С помощью функции *supported_frequencies* можно запросить поддерживаемые частоты конкретного тактового сигнала, а используя функцию *set_clock_frequency* – установить требуемую частоту из списка поддерживаемых частот. Функция *current_frequency* возвращает текущую установленную частоту.

GPIO

Как правило, любой контроллер предоставляет возможность прямого управления состояниями некоторого множества своих ножек - GPIO, при этом они часто мультиплексируются с сигналами периферии GPIO-мультиплексором. Данный модуль служит для управления GPIO-мультиплексором.

Для установки направления типа ножки – ввод или вывод – используется функция *set_direction*. Функции *set_pin_state* и *get_pin_state* служат соответственно для установки или запроса состояния ножки. Для переключения функции пина с GPIO на какую-либо функцию периферии служит *set_function*.

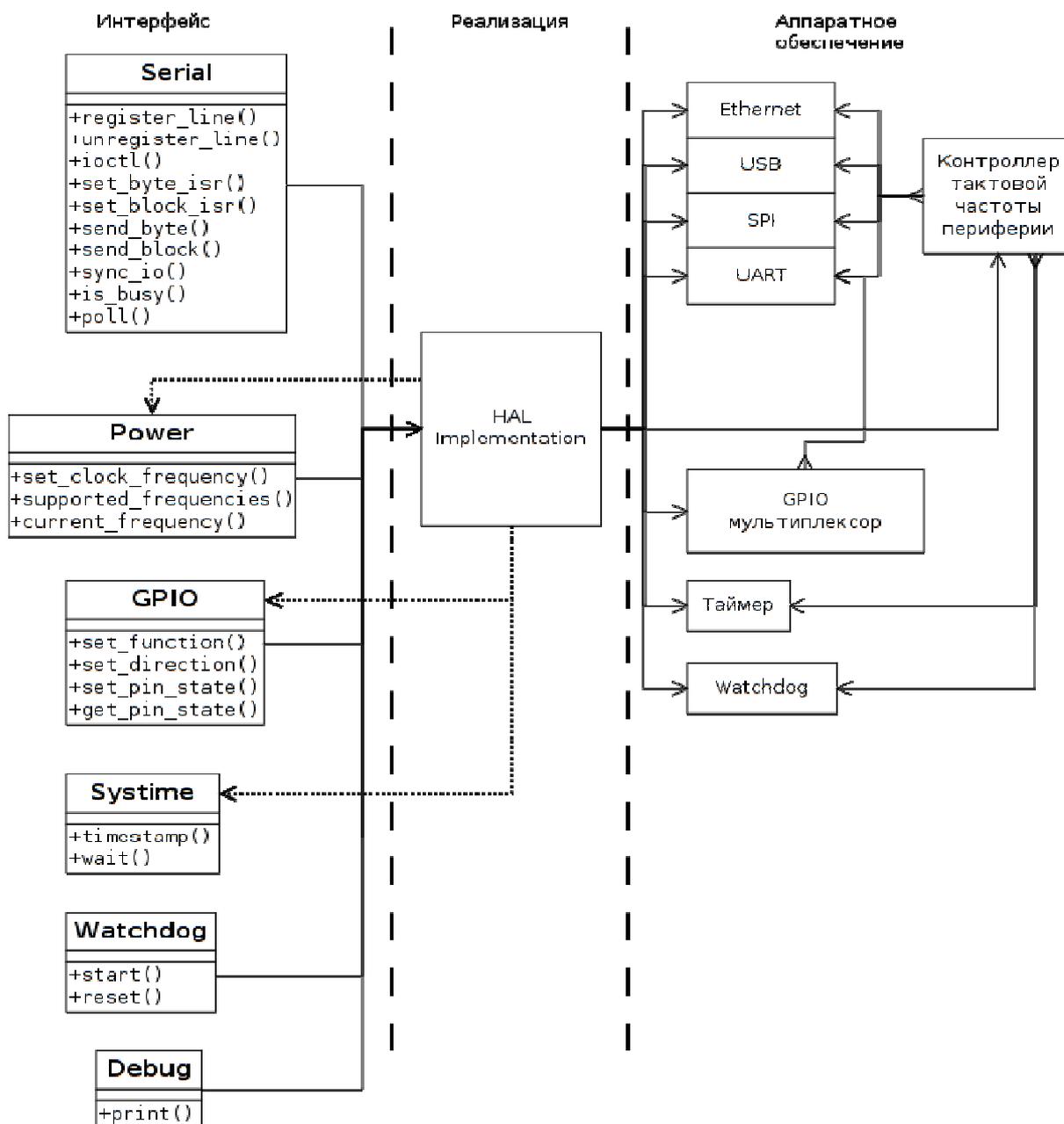


Рис. 7. Общий вид интерфейса

SYSTEMTIME

Этот модуль служит для грубого подсчета времени. Он имеет всего две функции – timestamp возвращает 32-х битное количество миллисекунд, прошедших с начала старта системы. Это значение используется для измерений промежутков времени, где не нужна большая точность – таймауты и т.д. Функция wait вызывает задержку в заданное количество миллисекунд.

WATCHDOG

Данный модуль служит для управления таймером watchdog. Функция start запускает watchdog. Функция reset сбрасывает watchdog.

ДРАЙВЕРЫ УСТРОЙСТВ

Интерфейс драйверов носителей данных. Для унифицированного доступа к носителям, все драйвера носителей данных поддерживают одинаковый интерфейс.

МЕНЕДЖЕР ПАМЯТИ

Используемый менеджер памяти устроен следующим образом. При инициализации создается несколько пулов, с разными размерами блоков. Каждый пул имеет некоторый базовый адрес, относительно которого считаются адреса блоков. Для каждого пула создаются две битовые карты: одна – карта занятости – отображает состояние блоков памяти – свободен / занят, вторая – карта смежности – используется для объединения

нескольких блоков в один. Каждый бит карты занятости сопоставлен одному блоку памяти из пула. Адрес соответствующего блока вычисляется из номера слова в карте и номера бита в слове следующим образом:

$$A = Base + WordNum \cdot N + BitNum \quad (1),$$

где A – адрес блока, $WordNum$ – номер слова в $Momega$, $BitNum$ – номер бита в слове, $Base$ – базовый адрес пула. Обратное вычисление выполняется следующим образом:

$$WordNum = \left\lfloor \frac{A - Base}{N} \right\rfloor,$$

$$BitNum = A - Base - N \cdot WordNum$$

Помимо карты выделения, для каждого пула создается иерархия дескрипторов, служащих для ускорения поиска свободных блоков. Каждый дескриптор имеет размер машинного

слова – 32 бит и делится на 8 частей по 4 бита. Дескрипторы верхнего уровня описывают состояние дескрипторов нижних уровней. Значение фрагментов дескрипторов:

$$D_{n,l}[i] = \max_k (D_{i,l+1}[k]), \quad (2)$$

где $D_{\{n,l\}}[i]$ – i -ый фрагмент слова n на уровне l , т.е. в каждом фрагменте записано максимальное значение из фрагментов описываемого данным фрагментом дескриптора. Фрагменты дескриптора нижнего уровня описывают состояние отдельных фрагментов карты занятости, а именно: значение фрагмента равно длине максимальной последовательности нулевых битов в описываемом слове.

На *рис. 8* изображен фрагмент иерархии дескрипторов для двухуровневой карты занятости.

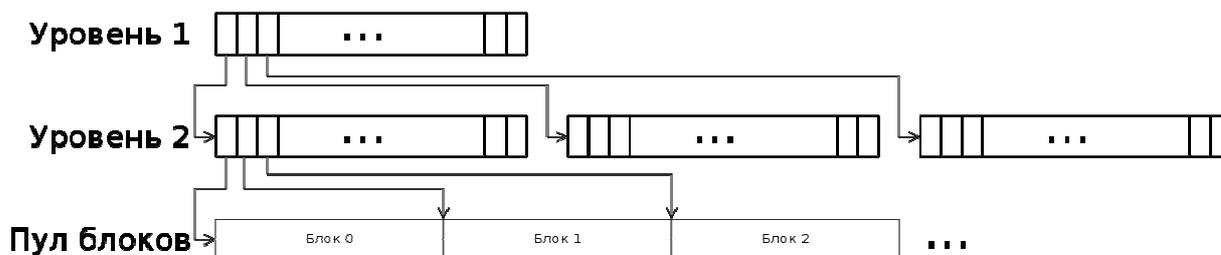


Рис. 8. Фрагмент иерархии дескрипторов для двухуровневой карты занятости

При выделении памяти из пула есть возможность выделить как отдельный блок, так и группу последовательных блоков. Выделение происходит следующим образом: используя иерархию дескрипторов, производится поиск цепочки свободных блоков достаточной длины. Найденные блоки помечаются в карте занятости единицами, а в карте смежности помечаются единицами все блоки в выделяемой цепочке за исключением последнего. После этого производится процедура восстановления инварианта (2).

В случае освобождения блока, процедура деаллокации находит соответствующие биты в картах занятости и смежности, согласно формуле (1). После этого, найденные биты устанавливаются в 0 и производится процедура восстановления инварианта (2).

Ниже приведены алгоритмы выделения и освобождения блоков из пула и анализ их быстродействия.

АЛГОРИТМ ВЫДЕЛЕНИЯ ЦЕПОЧКИ БЛОКОВ ИЗ ПУЛА

// TODO: формализовать нотацию и дать расшифровку

Входные данные: M – дескриптор карты занятости, N – длина запрашиваемой цепочки в блоках.

- 1 Если M – дескриптор карты занятости
 - 1.1 Найти непрерывную цепочку нулей в M .
 - 1.2 Установить её в 1
 - 1.3 Установить соответствующие ей биты в карте смежности.
 - 1.4 Восстановить инвариант (2)
- 2 Иначе
 - 2.1 Найти первый $M[i], M[i] \geq N$. Если такого не существует – ошибка.
 - 2.2 Получить M' – дескриптор, соответствующий $M[i]$.
 - 2.3 Рекурсивно вызвать данную процедуру с M' и N .

Алгоритм освобождения блока

1. Вычислить $WordNum$ и $BitNum$ по формуле (1)
2. Вычислить длину цепочки N с помощью карты смежности
3. Занулить биты $BitNum..Bitnum+N$ в картах смежности и выделения
4. Восстановить инвариант (2)

Алгоритм восстановления инварианта (2)
Входные данные M – дескриптор карты занятости, из-за которого произошло нарушение инварианта.

- 1 $L =$ максимальная длина непрерывной цепочки нулей в M
- 2 Пока M не является top-level дескриптором
 - 2.1 $(M',i) = \text{parent}(M)$
 - 2.2 $M'[i] = L$
 - 2.3 $L = \max_k(M'[k])$

АНАЛИЗ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ

// TODO: Средний слой архитектуры ПО ИФС

1. TCP/IP-стек. В качестве стека был использован TCP/IP-стек *lwIP* [8], распространяющийся под свободной лицензией на основе BSD [9].

2. Виртуальная файловая система (VFS).

3. Планировщик ввода-вывода. Его функцией является управление запросами на ввод-вывод от остальных подсистем с помощью специальных алгоритмов для более эффективного использования пропускной способности шины данных накопителя.

4. Подсистему точного времени. Её основной функцией является подстройка генератора, с помощью которого считается время и предоставление текущего времени остальным подсистемам.

ВИРТУАЛЬНАЯ ФАЙЛОВАЯ СИСТЕМА

Обоснование необходимости в такой системе состоит в том, что используется несколько носителей и несколько ФС.

Вся работа с файлами – создание, запись, чтение – идет через слой виртуальной файловой системы. Это дает два основных архитектурных преимущества: во-первых, обеспечивается равномерный доступ к разным файловым системам, во-вторых, уничтожается зависимость сервисов верхних слоев от конкретных ФС. ВФС предоставляет возможность монтирования и демонтирования ФС в общий корень. После монтирования, работа с ФС выполняется с помощью интерфейса ВФС, который делегирует свои вызовы драйверам конкретных примонтированных ФС.

МОДЕЛЬ ОПЕРАЦИЙ ДРАЙВЕРОВ ФС

Перед монтированием ФС, драйвер заполняет структуру *vfs_filesystem*, содержащую указатели на функции интерфейса ФС и указатель на сам драйвер ФС, после чего эта структура добавляется в список ВФС. Файлы и директории внутри ФС идентифицируются стандартным путем (слэши, символы и т.п.) относительно корня. Так как вся работа с ФС происходит через интерфейс ВФС, то полный

путь ВФС состоит из номера ФС и пути файла в ФС.

Всего было выделено 3 подмножества операций, которые должны поддерживать драйвера ФС, чтобы иметь возможность быть использованными с помощью ВФС: операции с ФС, операции с файлами и итерация по ФС. Операции с ФС включают в себя: создание и удаление файлов и директорий, операцию проверки существования файла или директории, а также операцию синхронизации, которая блокирует выполнение программы пока все асинхронные операции с ФС не будут завершены.

Операции с файлами включают в себя: операции открытия и закрытия файла, операции чтения и записи и операции перемещения по открытому файлу. Операций чтения две – одна из них просто считывает данные из файла в предоставленный буфер, другая же возвращает указатель на внутренний буфер драйвера.

Операции итерации включают в себя три функции: *fs_iterate_start* принимает в качестве аргумента путь до директории, в которой будет производиться итерация и возвращает итератор. Функция *fs_iterate_next* принимает в качестве аргумента итератор и возвращает информацию о следующем файле, если таковой имеется, в противном случае считается, что итератор завершил перебор директории. Такой итератор должен быть передан функции *fs_iterate_end* для освобождения занимаемой им памяти и прочих ресурсов.

ПЛАНИРОВЩИК ВВОДА-ВЫВОДА

Существует две основных модели ввода-вывода для блочных носителей данных – асинхронная модель и синхронная. В синхронной модели поток выполнения при запросе операции ввода-вывода приостанавливается до тех пор, пока операция не будет завершена. При старте синхронной операции ввода-вывода управление передается ядру, которое выполняет соответствующий запрос драйверу устройства и возвращает управление при завершении операции. В асинхронной модели поток выполняет запрос к подсистеме ввода-вывода и продолжает свое выполнение без блокировки, при этом он в любой момент времени может определить, закончилась ли запрошенная операция. Обе модели имеют свои преимущества и недостатки: с одной стороны, использование синхронной модели упрощает написание программы, с другой стороны, асинхронная модель позволяет достичь более высокой производительности [10].

В данной системе реализованы обе модели. Это дает возможность использовать ту модель ввода-вывода, которая более подходит для решения той или иной задачи. На нижнем уровне синхронные вызовы транслируются в асинхронные запросы следующим образом:

- При синхронном запросе на запись, подсистема ввода-вывода определяет, нет ли активного в настоящий момент асинхронного запроса на запись, если он есть, то выполнение блокируется до тех пор, пока он не будет выполнен. Далее, подсистема ввода-вывода формирует новый асинхронный запрос к драйверу устройства и возвращает управление основному потоку, не блокируя.

- При синхронном запросе на чтение, подсистема ввода-вывода опять проверяет, нет ли активного запроса на запись, а также блокирует выполнение, пока он не будет выполнен, после чего формирует новый асинхронный запрос на чтение и ждет, пока он не будет выполнен. Как только драйвер устройства сигнализирует о том, что запрос выполнен, подсистема ввода-вывода возвращает управление основному потоку.

Такая трансляция приводит к тому, что при выполнении операции записи, основной поток продолжает выполняться одновременно с записью и блокируется только тогда, когда это необходимо – операция чтения блокируется всегда, т.к. прочитанные данные могут быть использованы непосредственно после операции чтения, однако для одиночной операции записи таких ограничений нет. Таким образом, ввод-вывод является на самом деле частично асинхронным, но выглядит для основного потока как синхронный.

Асинхронный запрос описывается структурой, которая содержит следующие поля:

1. Указатель на буфер данных и его длину
2. Логический адрес блока, на котором производится операция.
3. Метка времени постановки запроса в очередь.
4. Флаги запроса: флаг направления запроса – запись-чтение, флаг владения буфера – если этот флаг установлен, то считается, что буфером владеет подсистема ввода-вывода, и она должна освободить буфер после завершения операции, флаг завершения – устанавливается при завершении запроса вне зависимости, был ли он успешным, флаг ошибки – устанавливается в случае ошибки.

Асинхронная модель дает преимущество в производительности, т.к. процессор может выполнять инструкции параллельно с вводом-выводом. Кроме того, т.к. асинхронная модель не налагает никаких ограничений на порядок выполнения операций, подсистема ввода-вывода может изменить порядок выполнения запросов, передав их драйверу устройства в порядке, отличном от того, в котором они были переданы подсистеме ввода-вывода. Конкретный набор оптимизаций, которые следует применять, зависит от типа носителя.

В данной системе в качестве носителя, на котором хранятся данные, служит *MicroSD*-карта памяти. Работа с *SD*-картами памяти может быть осуществлена как через

последовательный интерфейс *SPI*, так и через параллельный интерфейс *SD/MMC*. В данной системе связь с картой памяти производится по интерфейсу *SD*, т.к. именно в этом режиме возможно достижение максимальной производительности ввода-вывода. Работа с картой памяти производится по известному протоколу, который определяет некоторое множество команд, из которых используются следующие:

- *CMD18* – чтение диапазона блоков
- *CMD25* – запись диапазона блоков
- *CMD12* – завершение ввода-вывода
- *CMD13* – запрос статуса и т.д.

При работе с *SD*-картой, для достижения максимальной производительности операций записи/чтения необходимо учитывать три особенности:

1. Активная операция ввода-вывода продолжается до тех пор, пока карте памяти не будет послана команда 12. Более новая версия стандарта *SD 3.0* определяет команду 23, с помощью которой можно задать заранее количество блоков для операции записи/чтения, однако на момент написания данной работы эта версия стандарта пока ещё не получила широкого распространения в виде поддержки в периферии контроллеров. Таким образом, любая операция записи/чтения происходит следующим образом: контроллер посылает карте памяти соответствующую команду и устанавливает указатель *DMA*-контроллера на начало буфера, а в регистр счетчика *DMA*-контроллера загружается размер передаваемых или прочитываемых данных. После того, как *DMA*-контроллер передал или прочитал все данные, он триггерит прерывание, по которому контроллер посылает команду 12.

2. *SD*-накопители используют технологию *NAND*, что означает, что для перезаписи определённого блока сначала требуется его стирание. Кроме того, это также означает, что более используемые блоки будут изнашиваться быстрее и в течение времени жизни носителя необходимо перепрообрабатывать испорченные блоки в новые. Внутренний контроллер *SD*-карты выполняет эти операции самостоятельно – он поддерживает карту отображений из логического адреса в физический и стирает при перезаписи нужный блок самостоятельно, если это необходимо, повышая количество времени, требуемое на операцию записи. Этого можно избежать, стирая заранее те области, которые на данный момент уже не нужны, но которые понадобятся в будущем. Для такого стирания стандарт *SD* определяет команду, которой в качестве аргумента передается начальный и конечный адреса диапазона блоков, которые будут стёрты.

3. При завершении операции ввода-вывода, карта памяти переходит в режим *BUSY*, в котором она обновляет свое внутреннее состояние и не может выполнять остальные

операции, особенно это актуально для операций записи. Таким образом, множество мелких запросов на ввод-вывод могут выполняться значительно дольше одного крупного, даже суммарный объем данных в первом случае равен объему данных запроса во втором случае. Из этого следует, что чем большими блоками производится ввод-вывод, тем выше производительность.

Исходя из этих особенностей, можно разработать алгоритм планировщика, который использует их для увеличения производительности по сравнению с обычным последовательным алгоритмом. Основные идеи две: во-первых, если два запроса затрагивают смежные области, их можно объединить в один – таким образом можно избежать задержки, которая была бы между этими запросами в случае их обычного выполнения. Необходимо учитывать, что такое объединение возможно только в случае, если направление запросов одинаковое, т.е. нельзя объединить запрос на запись с запросом на чтение. Обычно, как запись, так и чтение производятся последовательно, т.е. при записи данных они записываются по порядку в каждый блок, без пропусков, таким образом, эта оптимизация годная.

Во-вторых, существуют блоки, на которых часто выполняются *Read-Modify-Write (RMW)* операции, т.е. блок загружается, изменяется его часть (как правило, небольшая – несколько машинных слов) и измененный блок записывается назад. Примером такой операции может служить изменение размера файла в соответствующей ему записи в директории при добавлении данных в его конец. Можно избежать большинства операций записи-чтения в данном случае, если организовать ввод-вывод через кэш блоков, который работает следующим образом: при чтении блока сначала просматривается список кэшированных блоков, и если запрошенный блок найден, он возвращается, в противном случае он читается с носителя и его копия помещается в кэш. При записи, блок помечается как “грязный”. Когда при очередном чтении блока происходит *cache miss* и свободных записей в кэше нет, то выбирается одна из существующих записей, проверяется, содержит ли она “грязный” блок, если да, то блок записывается в свое место, а запись кэша ассоциируется с новым прочитанным блоком. Фактически, кэш использует политику сквозной записи, за исключением того, что блоки периодически записываются на носитель, даже если они не выгружаются из-за чтения нового блока.

ПОДСИСТЕМА ТОЧНОГО ВРЕМЕНИ

Подсистема точного времени выполняет несколько функций, связанных с синхронизацией и учетом времени, а также декодированием сообщений модуля *GPS*.

Как было сказано выше, сообщения модуля *GPS* приходят по линии *RS-485* в *FPGA* и декодируются там из физического представления в сообщения. Подсистема точного времени непрерывно считывает эти сообщения из регистров *FPGA* и декодирует их.

При инициализации, система начинает отсчет времени с нулевого значения. Это продолжается до тех пор, пока не будет получено сообщение времени от модуля *GPS* с номером текущей секунды. После этого, подсистема точного времени устанавливает соответствующий флаг в регистрах *FPGA*, что приводит к тому, что синтезатор частоты будет синхронизирован по следующему секундному сообщению модуля *GPS*. После этого, полученное значение секунды записывается в регистр счетчика секунд. С этого момента система считается синхронизированной. При синхронизации регистрация останавливается и перезапускается.

В процессе работы системы, сигнал *GPS* может пропадать и появляться, вследствие изменения положения спутников на орбите Земли. Пропадание сигнала не означает потери точного времени, т.к. как было сказано выше, стабильность опорного генератора частоты находится на уровне 10^{-7} . Тем не менее, чем больше промежутки времени, в течение которого система работала без подсинхронизации, тем больше отстройка времени от истинного значения. Стандарт *MiniSEED* позволяет указывать величину, называемую *time_quality*, характеризующую качество времени в момент записи данных. Метод расчета этой величины оставляется на усмотрение источника данных, но значения должны лежать в диапазоне от 0 до 100. Эта величина также рассчитывается подсистемой точного времени следующим

образом: $\min\left(100 - \frac{\Delta \cdot 10^{-7}}{f}, 0\right)$, где Δ – количество секунд с последнего момента *VALID*, f – частота дискретизации.

АЛГОРИТМЫ ПОДСТРОЙКИ ВРЕМЕНИ

Как уже было сказано выше, при первичной синхронизации регистр фазы синтезатора частоты сбрасывается, после чего синтезатор частоты начинает выдавать периодический сигнал, с помощью которого ведется учет времени в системе. Из-за нестабильности опорного генератора время системы расстраивается относительно времени *UTC*, поэтому возникает необходимость плавной подстройки частоты. Для этого мы должны зафиксировать значение регистра фазы в момент прихода сигнала *PPS* и сравнить его с нулевым значением и на основании результата изменить напряжение так, чтобы уменьшить рассинхро-

низацию. Существует несколько алгоритмов, по которым может производиться такое изменение.

ПИД-РЕГУЛИРОВАНИЕ

Одним из очевидных методов является управление напряжением генератора с помощью ПИД-регулятора. Для этого, мы периодически зашелкиваем значение регистра фазы по сигналу PPS, получая текущую расстройку системных часов d , после чего подаем напряжение на генератор опорной частоты:

$$V = C_p \cdot d + C_i \cdot A + C_d \cdot \frac{\delta d}{\delta t}$$

$$A = \sum_0^T d(t)$$

где A является переменной-аккумулятором, в которой мы накапливаем значение d на каждом шаге. Используя данный алгоритм, следует учитывать джиттер сигнала PPS. Типичное значение джиттера равно 100 нс, таким образом, выполнять подстройку каждую секунду нецелесообразно, поэтому лучше всего делать это каждые несколько секунд.

В реальных системах, как правило, не имеет особого значения длительность первого переходного процесса. Гораздо важнее, чтобы система правильно подстраивала выходное напряжение при необходимости, поэтому для данного метода дифференциальный тракт является необязательным.

Однако данный метод дает плохие результаты в условиях плохого приёма GPS-сигнала. Если сигнал пропадёт до окончания переходного процесса и будет отсутствовать слишком долго, расстройка может оказаться неприемлемо большой (см. рис. 9).

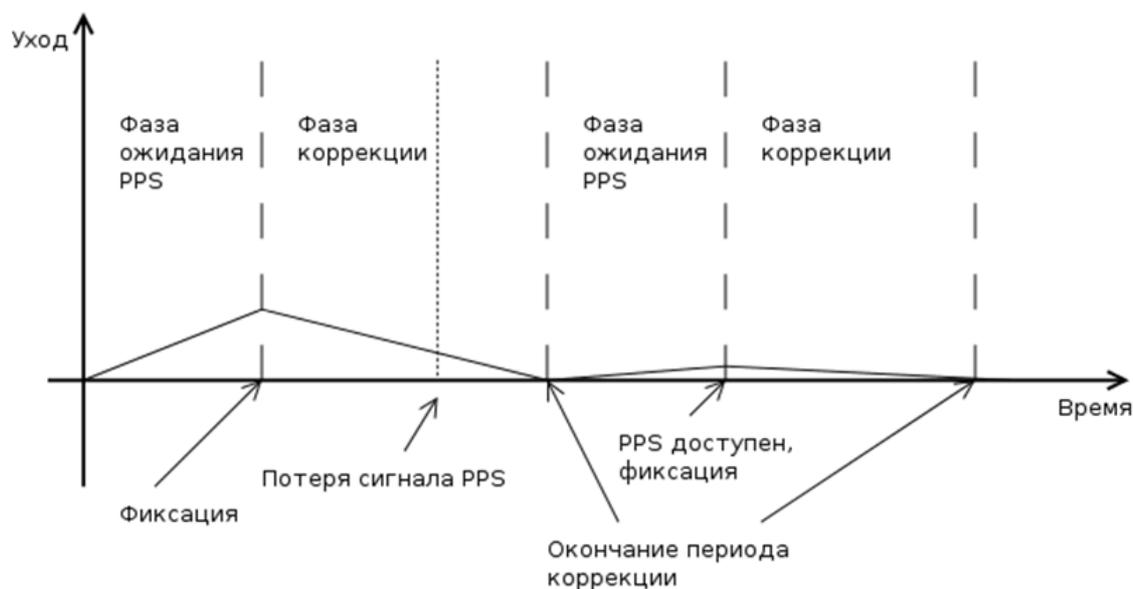


Рис. 9. Распределение фаз сигнала во времени

ОДНО- / ДВУХ- / ТРЁХ-ФАЗНЫЙ МЕТОД

Следующая группа методов основана на линейной модели генератора. Предположим, что расстройка генератора может быть представлена в виде:

$$\Delta = T \cdot k \cdot (v - v_0),$$

где T — период, на котором проводится измерение, v — управляющее напряжение генератора, Δ — уход времени за время T , k , v_0 — константы модели, v_0 соответствует напряжению, при котором генератор генерирует точно необходимую частоту, k является наклоном характеристики скорость ухода — напряжение.

Таким образом, вычислив коэффициенты модели k и v_0 и измерив расстройку времени, мы можем рассчитать корректирующее значение напряжения, т.е. такое напряжение, при котором расстройка плавно обратится в ноль за некоторое время τ :

$$v = v_0 + \frac{\Delta}{\tau k}$$

Таким образом, можно использовать следующий алгоритм:

1. Зафиксировать значение расстройки.
2. Рассчитать корректирующее значение по вышеприведенному соотношению и подать его на генератор.
3. Подождать τ .
4. Повторить.

Нетрудно заметить, что данный алгоритм страдает от того же самого недостатка, что и предыдущий — если в момент фиксации сигнал PPS будет отсутствовать достаточно долго, то системное время может уйти вперед или назад значительно, т.к. на генератор будет подаваться корректирующее значение, хотя коррекция уже закончена (см. рис. 9).

Эту проблему можно легко исправить следующим образом, если учесть, что в нашей модели v_0 является напряжением нулевого ухода:

1. Ожидать доступности сигнала PPS
2. Зафиксировать значение расстройки
3. Рассчитать корректирующее значение и подать его на генератор
4. Подождать τ
5. Подать на генератор напряжение V_0
6. Повторить

Усовершенствованный алгоритм состоит теперь из двух фаз – фазы коррекции и фазы ожидания PPS. Теперь, даже при редкой доступности сигнала GPS подстройка будет выполняться корректно. Несмотря на то, что после коррекции мы устанавливаем напряжение нулевого ухода, из-за нестабильности опорного генератора по прошествии достаточно большого времени системное время будет рассинхронизовано, поэтому данный алгоритм следует повторять в бесконечном цикле на всем протяжении работы системы.

Коэффициенты модели k и v_0 , как правило, задаются на этапе калибровки и считаются постоянными на всем протяжении работы прибора. Это не совсем корректно, т.к. в этом случае не учитывается старение генератора и прочие изменения характеристик с течением времени, изменением температуры и прочих условий окружения. В связи с этим имеет смысл добавить в алгоритм ещё одну фазу - фазу коррекции модели:

1. Ожидать доступности сигнала PPS
2. Зафиксировать значение расстройки
3. Подождать $\tau_{\text{мод}}$
4. Ожидать доступности сигнала PPS
5. Измерить время $\tau_{\text{изм}}$, прошедшее с момента прошлой фиксации
6. Зафиксировать значение расстройки
7. Вычислить новое значение v_0
8. Рассчитать корректирующее значение
9. Подождать $\tau_{\text{корр}}$
10. Установить значение V_0
11. Повторить

Здесь под $\tau_{\text{мод}}$ и $\tau_{\text{корр}}$ мы понимаем период коррекции модели и период коррекции ухода генератора соответственно. Период коррекции модели может быть не очень большим, на практике, значение 30 секунд дает приемлемые результаты.

ВЕРХНИЙ СЛОЙ АРХИТЕКТУРЫ ПО ИФС

Верхний слой содержит те сервисы, которые выполняют полезную работу:

1. Хранилище данных.
2. Индекс.
3. Miniseed-энкодер.
4. Сервер команд
5. ТСР/IP-серверы.

ПОДСИСТЕМА ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

После оцифровки и кодирования данные сохраняются в хранилище данных. Размер блоков *miniseed*, создаваемых энкодером равен размеру страницы на SD-карте, используемой в качестве носителя, таким образом, каждая страница может содержать отдельный блок данных. Т.к. каждый *miniseed*-блок содержит в своем заголовке все необходимые метаданные, чтение данных может начинаться и заканчиваться на любых блоках.

Подсистема хранения данных создает на носителе три области: контрольный блок, область хранения данных и область лога. Контрольный блок содержит в себе информацию о текущем состоянии подсистемы хранения данных:

- Текущий номер блока
- Максимальный номер блока
- Диапазоны адресов страниц, отведённых для области хранения данных
- Размер кластера
- Идентификатор первого блока в области хранения данных
- Указатель заполнения области хранения данных
- Контрольная сумма контрольного блока *<lolwut>*

Область хранения данных представляет собой кольцевой буфер блоков – запись блоков происходит последовательно, при записи последнего блока (переполнении), указатель записи сбрасывается на начало буфера. До переполнения указатель заполнения области хранения данных указывает на последнюю страницу, содержащую данные, после переполнения он указывает на последнюю страницу области хранения данных. В связи с тем, что запись происходит не одиночными блоками, а кластерами, размер области хранения данных выбирается таким образом, чтобы он был кратен размеру кластера.

В области лога хранятся сообщения системы об основных произошедших событиях. Эти сообщения могут быть скачаны позже по сети и обработаны специальной программой для просмотра. Область лога состоит из 64-байтных записей, содержащих метку времени, метку подсистемы, которая записывает сообщение и собственно сообщение в кодировке UTF-8. Кроме того, первая запись в логе содержит информацию о состоянии этой области: начальная и конечная страницы области лога, а также текущая позиция для записи. Область лога организована в виде кольцевого буфера. Все сообщения лога также попадают в промежуточный буфер. При достижении определённого количества сообщений в этом буфере, создается новый *miniseed*-блок с типом

кодирования <ASCII>, в который записываются накопленные сообщения и который сохраняется как очередной блок в области хранения данных. Это позволяет получать сообщения лог-файла в системах использующих только *Seedlink*.

В процессе инициализации, подсистема хранения данных проверяет, существует ли на носителе валидный контрольный блок, и если нет, то создает его, в этом случае указатели записи устанавливаются в начальное значение и область хранения данных считается пустой. Валидность контрольного блока определяется по двум факторам: сигнатура контрольного блока и контрольная сумма. Контрольная сумма считается как сумма всех машинных слов, из которых состоит контрольный блок, за исключением слова, содержащего саму контрольную сумму.

Интерфейс подсистемы хранения данных состоит из нескольких функций, наиболее важными из них являются две:

- Функция сохранения блока – *datastorage_store_block*
- Функция запроса блока по его номеру – *datastorage_retrieve_block*

Функция сохранения блока принимает в качестве аргумента буфер с сохраняемым блоком, сохраняет его в области хранения данных и возвращает числовой идентификатор сохранённого блока.

Нумерация блоков начинается с 0 и идет последовательно до $2^{24} - 1$, после чего следующему блоку присваивается номер 0 и нумерация начинается сначала. Запись блоков на носитель производится кластерами с фиксированным размером страницы, который указан в контрольном блоке подсистемы хранения данных. По умолчанию это значение равно 32. Текущий кластер хранится в буфере, в который копируются сохраняемые блоки, когда текущий кластер полностью заполняется, формируется асинхронный запрос на запись текущего кластера, счетчик кластеров инкрементируется и для нового кластера выделяется новый блок памяти. Также, каждый сохраняемый блок сохраняется в кэше блоков ограниченного размера, при этом из кэша удаляется самый старый из сохранённых в нём блоков. Кэш блоков реализован как простой односвязный список пар идентификатор-блок данных.

Функция чтения блока принимает в качестве аргумента номер блока и возвращает блок данных с запрошенным номером, если он существует в хранилище данных. При этом возможны следующие варианты:

1. Блок с запрашиваемым номером находится в кэше. В этом случае, блок копируется из кэша. Никакие операции чтения с носителя в данном случае не производятся. Это позволяет повысить производительность системы при потоковой передаче данных в реальном времени.

2. Блок с запрашиваемым номером находится в основном буфере чтения. В этом случае, блок копируется из этого буфера. В этом случае также никакие операции с носителем не производятся.

3. Блок с запрашиваемым номером находится в дополнительном буфере чтения. В таком случае буферы меняются местами: основной буфер становится дополнительным и наоборот. Далее иницируется асинхронный запрос на чтение следующей порции блоков, идущих после тех, что находятся в основном буфере. Это считывание производится в дополнительный буфер. Такая схема с двойным буфером позволяет оптимизировать производительность последовательного чтения блоков, т.к. в этом случае идет предварительная загрузка блоков, которые будут нужны в ближайшем будущем, что позволяет избежать ожидания при их считывании, когда они понадобятся.

4. Блок с запрашиваемым номером не найден ни в кэше, ни в буферах чтения. В этом случае в основной буфер считывается последовательность блоков, начинающаяся с запрошенного. После того, как чтение завершилось, возвращается первый блок и иницируется асинхронное чтение следующей порции в дополнительный буфер.

5. Блок отсутствует в области хранения данных. В этом случае процедура чтения завершается с неудачей. Это может означать, что запрошенный блок либо пока ещё не был сохранён, либо был уже перезаписан новым. В зависимости от этого, при запросе потоковой передачи с несуществующим начальным номером, передача начинается либо с самого старого, либо с самого нового сохранённого блока.

При чтении блока с носителя необходимо конвертировать номер блока данных в номер страницы носителя. При этом необходимо учитывать две возможности: общее количество страниц в области хранения данных T может быть как меньше диапазона идентификаторов, так и больше – в зависимости от размера носителя.

Алгоритм для этой конверсии следующий: пусть M – максимальное значение идентификатора блока. Тогда:

1 $T < M$

1.1 Указатель заполнения < Конец ОХД >

1.1.1 $end_sqnum = start_sqnum + (УЗ - LBA \text{ первой страницы ОХД})$

1.1.2 Если $id < start_sqnum$ или $id > end_sqnum$, то блок не найден

1.1.3 Иначе $return (id - start_sqnum) + LBA \text{ первой страницы ОХД}$

1.2 Указатель заполнения = Конец ОХД

1.2.1 $\Delta = current_sqnum - id$

1.2.2 Если $\Delta < 0$ или $\Delta > T$, то блок не найден

1.2.3 $B = current_sqnum - start_sqnum$

1.2.4 Если $B < 0$, $B += M$

- 1.2.5 Если $B < \Delta$, $\Delta := T$
- 1.2.6 return LBA первой страницы
ОХД + B - Δ
- 2 $T \geq M$
 - 2.1 $\Delta = \text{current_sqnum} - id$
 - 2.2 $Y3 < \text{start_sqnum} + M$
 - 2.2.1 Если $\Delta > \text{current_sqnum}$ или $\Delta < 0$, блок не найден
 - 2.2.2 return $\text{current_page} - \Delta$
 - 2.3 $Y3 \geq \text{start_sqnum} + M$
 - 2.3.1 Если $\Delta < 0$, $\Delta += M$
 - 2.3.2 return $\text{current_page} - \Delta$

ИНДЕКС ДАННЫХ

Индекс предоставляет альтернативную модель доступа к данным – в отличие от модели хранилища данных, которая предоставляет блочный доступ к данным по числовому идентификатору, индекс предоставляет пофайловый доступ к данным. Индекс хранит соответствия блоков их временам, что дает также возможность получения данных в заданном временном окне.

ЭНКОДЕР ДАННЫХ

Для уменьшения объема, занимаемого данным, они сжимаются и пакуются в *miniseed*-блоки, которые потом непосредственно сохраняются в хранилище. Каждый блок содержит все свои метаданные – имя канала, имя станции, частота дискретизации, время и др.

СЕРВЕРЫ TCP/IP

Seedlink-сервер обслуживает запросы данных по протоколу *seedlink*.

FTP-сервер предоставляет доступ к индексу данных и возможность пофайлового запроса проиндексированных данных по протоколу FTP.

Telnet-сервер предоставляет интерфейс для удалённого управления и конфигурации устройства.

Vmchr-сервер служит для взаимодействия устройства и сервера сбора данных.

АРХИТЕКТУРА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ВЕРХНЕГО УРОВНЯ

В итоге записи сигналов запрашивает управляющее программное обеспечение на компьютере, состоящее из серверной и клиентской части. Сервер сбора данных выполняет следующие функции:

1. Получение данных с измерительных узлов
2. Перекодирование потока данных в соответствии с настройками

3. Сохранение потока данных на диск
4. Предоставление потока клиентской программе для визуализации
5. Обнаружение событий (критерий *LTA/STA*)
При конфигурации сервера ему предоставляется список адресов, по которым он подключается и находит устройства.
Клиент служит для визуализации данных в режиме реального времени.
Общение между клиентом и сервером производится по протоколу, основанном на технологиях *ZeroMQ* и *ProtocolBuffers*.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Система CiesComp 3. URL: <http://www.seiscomp3.org/>
- [2] Работа со стеком TCP/IP в сетях Windows NT. URL: http://citforum.ru/operating_systems/winntadm/winntadm_09.shtml
- [3] С.В. Баранов. Применение вейвлет-преобразования для автоматического детектирования сейсмических сигналов. URL: <http://www.maikonline.com/maik/showArticle.do?uid=VAF2X6YGT3&lang=ru>
- [4] Serial Digital Interface. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Serial_Digital_Interface
- [5] Всемирное координированное время. URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D1%81%D0%B5%D0%BC%D0%B8%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BA%D0%BE%D0%BE%D1%80%D0%B4%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B2%D1%80%D0%B5%D0%BC%D1%8F
- [6] Сайт точного времени URL: <http://tochnoyevremya.com/%D0%B2%20UTC>
- [7] Протокол TCP/IP. Учебник Википедии. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/TCP/IP>
- [8] LwIP. Учебник Википедии. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/LwIP>
- [9] BSD. Учебник Википедии. URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/BSD>
- [10] Э. Таненбаум, А. Вудхалл. Операционные системы. Разработка и реализация. 3-е издание. Изд-во Питер. С-Петербург. 2010.



Денис Терешкин, аспирант кафедры Автоматики НГТУ, автор 20 научных статей. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, лазерная физика, программные системы.
E-mail: todin.dirihle@gmail.com

Пространственная фильтрация сейсмических событий, возникающих при гидравлическом разрыве пласта

Е. В. Рабинович¹, П. И. Вайнмастер², Ю.Л. Новаковский³

^{1,2}Новосибирский государственный технический университет, ³ЗАО НПП Сибнефтегаз

Аннотация – Предложена и построена трехмерная модель зоны трещиноватости продуктивного пласта при проведении ГРП. Для устранения избыточности данных локации была применена оригинальная пространственная фильтрация.⁴

Ключевые слова – Гидравлический разрыв пласта, трещина, проппант, микроземлетрясения, фильтрация, триангуляция Делоне.

1. ВВЕДЕНИЕ

Гидравлический разрыв пласта (ГРП) – является эффективным методом увеличения темпов отбора нефти из продуктивных пластов и более полной выработки месторождения [1]. Сущность метода ГРП заключается в том, что на забое скважины путем закачки жидкости создается давление, превышающее горное давление. Порода продуктивного пласта разрывается по направлениям минимальных напряжений горного давления и за счет продолжающейся закачки жидкости образовавшаяся зона трещиноватости увеличивается в размерах (Рис. 1).

Для дальнейшей разработки продуктивного пласта, оценки притока добываемого флюида и других производственных целей необходимо знать расположение и размеры, возникшей при проведении ГРП зоны трещиноватости.

В данной работе предлагается метод построения трехмерной модели зоны трещиноватости, позволяющей оценить ее положение и геометрические размеры.

Вместе с жидкостью в трещины транспортируется расклинивающий агент (*проппант*), который удерживает их в закрепленном состоянии после снятия избыточного давления. За счет раскрытых трещин продуктивного пласта у забоя создается высокопроводящий канал для поступления в скважину дополнительного флюида.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При нагнетании под высоким давлением жидкости в пласт происходит растрескивание горных пород. Хотя сами возникающие трещины почти несейсмичны на их границах происходят малые сейсмические события – микроземлетрясения. Это микросейсмические колебания частиц среды, или, иначе говоря, трески (акустические колебания).

Микроземлетрясения излучают упругие сейсмические волны, которые могут регистрироваться сейсмическими приемниками, на чем основаны современные методы локации источников сейсмических сигналов и приемы картирования пространственного положения, оценки размеров, ориентации и динамики магистральной трещины или трещиноватой зоны, возникающих при проведении ГРП [3].

Сейсмические антенны, используемые для локации источников сигналов, выявляют трехмерное «облако» микроземлетрясений, внутри которого проходит магистральная трещина или ансамбль трещин [4].

Задача определения параметров модели трещиноватости, возникающей при проведении ГРП, сводится к локализации гипоцентров сейсмических источников и восстановлению по ним пространственных характеристик трещин.

В данной работе для оценки размеров и положения зоны трещиноватости применяется метод локации источников микросейсмических сигналов наземной нерегулярной системой приема [5, 6].

Согласно этому методу микросейсмический источник колебаний, зарегистрированный сейсмической антенной, представляется в виде узла (точки) виртуальной трехмерной сетки нанесенной в области расположения продуктивного пласта. Он характеризуется координатами (X, Y) в горизонтальной плоскости пласта, глубиной расположения источника относительно поверхности земли H , амплитудой колебания источника A и моментом времени фиксации колебания T .

⁴ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

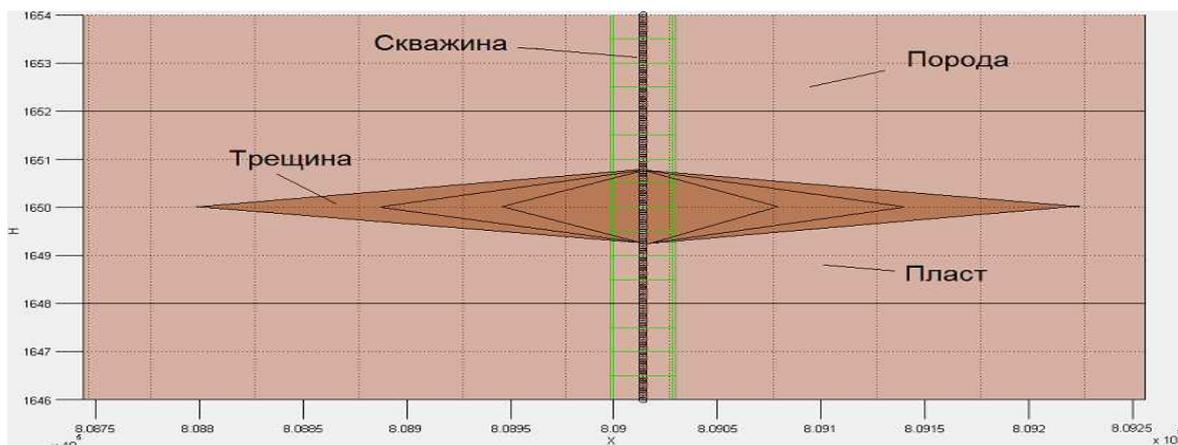


Рис. 1. Схема (вертикальное сечение) скачкообразного развития трещины [2]

Исследование полевых и синтетических данных показало, что сейсмические источники, расположенные в одной плоскости продуктивного пласта на глубине 1650 метров, надежно обнаруживаются, а погрешность определения координат одиночных источников не превышает 1 метра.

Однако существенные проблемы возникают при трехмерной локализации источников микросейсмических сигналов. Дело в том, что в отличающихся по высоте всего на шаг дискретизации (1 м) параллельных плоскостях локализации выявляется большое количество близкорасположенных узлов сетки, в которых наблюдается сейсмическая активность. Возникает проблема отождествления этих

близкорасположенных узлов разных плоскостей одному источнику микросейсмических сигналов. Или наоборот, разделения их по нескольким источникам микросейсмических сигналов.

Кроме того реальные данные ГРП характеризуются большой интенсивностью сейсмической активности в объеме области мониторинга. В горизонтальных плоскостях сечения трехмерного «облака» микросейсмических событий обнаруживается высокая плотность этих событий (Рис. 2).

На рисунке также изображен вертикальный забой в виде черного стержня и вокруг него зона отчуждения размером $30 \times 30 \text{ м}^2$, выделенная квадратами зеленого цвета.

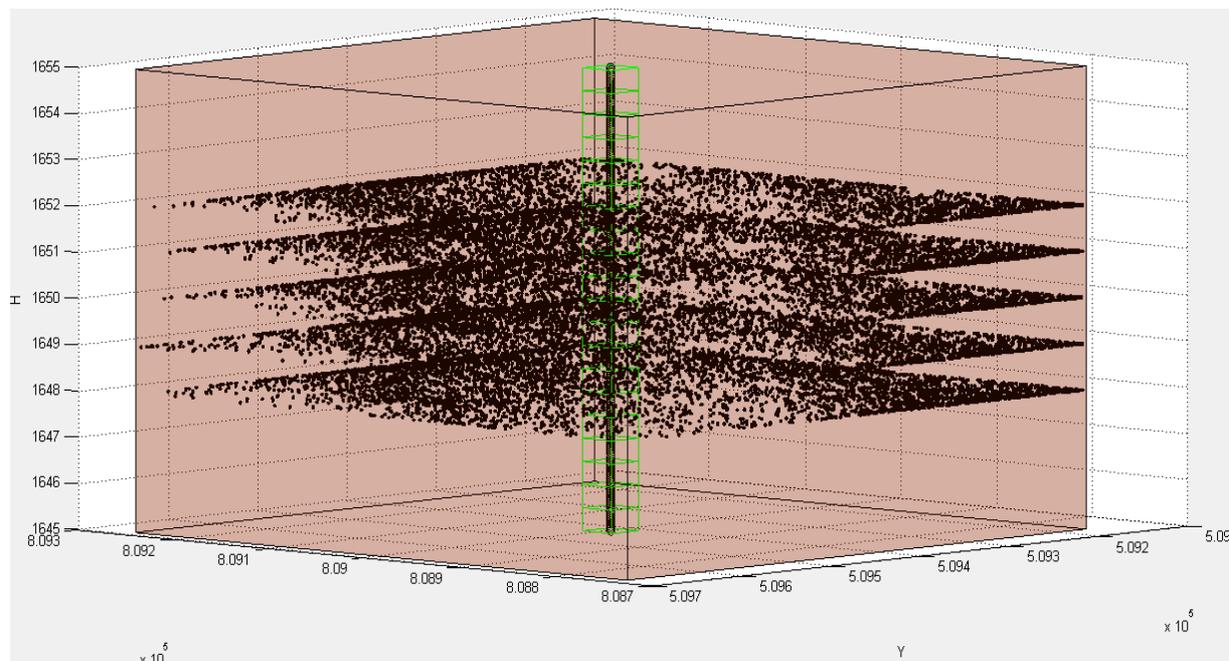


Рис. 2. Горизонтальные сечения трехмерного «облака» микросейсмических событий

Следует обратить внимание, что на рисунке масштаб по высоте в сто раз больше, чем масштаб в плоскости продуктивного пласта. По высоте изображено 5 метров, в то время как размер области в плоскости локации равен $512 \times 512 \text{ м}^2$.

Задача, рассматриваемая в данной работе, состоит в построении по заданному набору узлов виртуальной сетки, нанесенной в области расположения продуктивного пласта, трехмерной модели трещиноватости в виде тонкой неровной однолистной поверхности.

3. МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

С точки зрения авторов одной из достаточно адекватных моделей трещиноватости продуктивного пласта (одно- и многолистных) является трехмерная модель в виде тонкой неровной однолистной поверхности. Будем называть ее распрямленным листом смятой бумаги (РЛСБ).

Более реалистической моделью, по-видимому, является не поверхность, а тонкий слой («блин») неравномерной толщины с рваными краями. То есть вертикальный размер слоя (толщина) много меньше его горизонтальных размеров (длина и ширина). Вопрос о толщине трещины, определяемой энергетическими характеристиками (амплитудами колебания) сейсмических источников, в рамках данной работы не обсуждается, поэтому будем строить модель трещиноватости в виде РЛСБ.

Следует отметить, что зона отчуждения вокруг забоя скважины во время проведения ГРП представляет собой мощный нелинейный источник сейсмических колебаний. Амплитуда этих колебаний - помех для мониторинга ГРП - существенно (в сотни раз) превышает амплитуды микроземлетрясений, вызванных раскрытием трещин на удалении от забоя. Поэтому зона размером $30 \times 30 \text{ м}^2$ вокруг центра забоя подвергается низкочастотной пространственной фильтрации (исключается из модели трещиноватости продуктивного пласта), что расширяет динамический диапазон амплитуд колебаний источников.

Для аппроксимации набора узлов и построения трехмерных поверхностей в работе применен метод *триангуляции Делоне*. Если по данным мониторинга ГРП, представленным на Рис. 2, методом Делоне построить трехмерную поверхность, то она будет выглядеть, как показано на Рис. 3. Здесь и далее более яркий цвет поверхности локализует большую амплитуду колебания источников.

Из рисунков 2 и 3 видно, что набор данных для аппроксимации избыточен. Во многих близлежащих узлах трехмерной виртуальной сетки обнаруживаются источники сейсмических сигналов. Видимо в процессе ГРП микроземлетрясения имеют гипоцентры на

расстояниях меньших разрешающей способности метода локации (1 м) или вообще имеют непрерывный пространственный характер. В результате происходит расфокусировка сейсмической антенны, которая ведет к размытию формы объекта исследования и появлению ошибочных узлов-источников.

Поэтому следует, задав форму модели трещины, осуществить приближение к ней при помощи *пространственной фильтрации*.

Суть предлагаемого алгоритма пространственной фильтрации заключается в выделении естественных «сгустков» (групп) узлов виртуальной сетки и определении в каждом из них «ключевых» точек. «Сгустки» узлов интерпретируются как единичные локальные события раскрытия трещины, а все вместе эти раскрытия составляют пространственную зону трещиноватости, образовавшуюся в процессе ГРП.

Такой подход позволяет сократить избыточность представления данных и дает возможность аппроксимации модели трещины РЛСБ на основе «ключевых» точек.

Для выделения естественных «сгустков» узлов виртуальной сетки производится их классификация на основе на расположения узлов внутри области локации. Задача классификации решается применением метода иерархической кластеризации [7], который осуществляет выделение компактных, разделенных друг от друга, близких по размеру кластеров («сгустков» узлов).

Решение задачи выделения кластеров по всей области локации имеет несколько серьезных недостатков. Наиболее очевидным из них является то, что при большом количестве узлов и малом расстоянии между ними, трудно выделить подходящие кластеры.

Альтернативным решением является разбиение продуктивного пласта (Рис. 2) на множество вспомогательных областей меньшего размера и выделение кластеров внутри каждой из них. «Ключевые» точки рассчитываются как центры масс кластеров.

Вспомогательные области представлены параллелепипедами, имеющими одинаковые параметры – длину, ширину, высоту и угол наклона (Рис. 4).

Очевидно, что от способа разделения области локации зависит как качество кластеризации, так и количество «ключевых» точек. Количество «ключевых» точек в одном параллелепипеде равно числу найденных в нем групп узлов, а общее их количество зависит от выбранных параметров разделения области на параллелепипеды.

Для обеспечения гибкости алгоритма введены управляющие параметры: шаг между параллелепипедами по оси X (по длине пласта) и

шаг по оси Y (по ширине). Варьированием этих параметров можно добиться того, чтобы параллелепеды находились друг от друга на

заданном расстоянии, не охватывая некоторые участки области локации, или накладывались друг на друга.

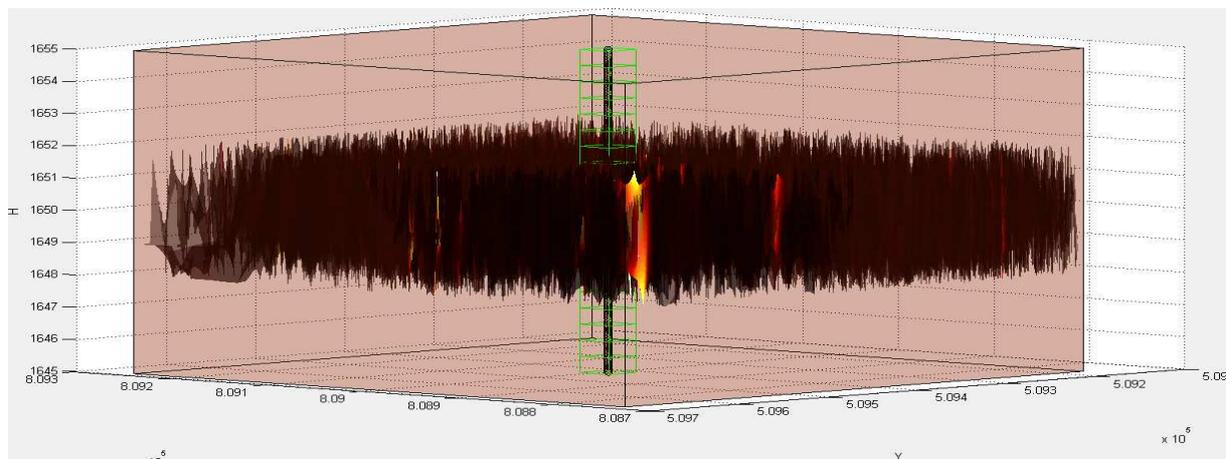


Рис. 3. Исходная трехмерная модель трещиноватости

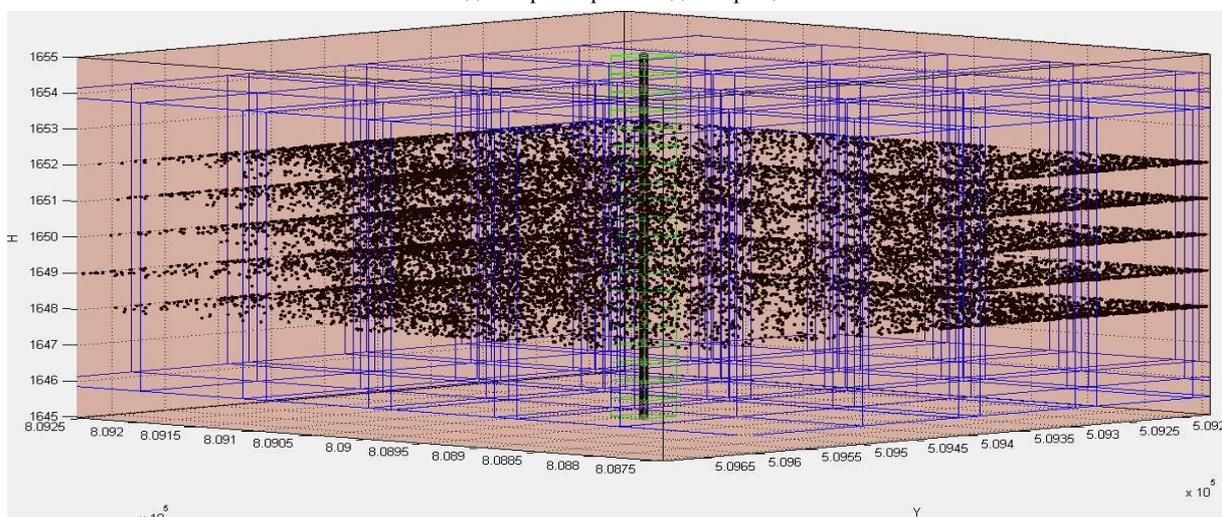


Рис. 4. Разбиение продуктивного пласта на параллелепеды

Одним из важных вопросов иерархической кластеризации, является определение оптимального числа кластеров в наборе данных [8]. В разработанном алгоритме реализованы три способа, основанные на различных критериях оптимальности.

Первый способ основан на вычислении «жизненных циклов» («lifetimes») кластеров [9].

Пусть первый кластер создан объединением двух узлов, находящихся на расстоянии $d1$ друг от друга. Следующий кластер был создан на основе узлов, имеющих между собой дистанцию $d2$, большую, чем $d1$, но при этом минимальную среди остальных дистанций. Тогда «жизненным циклом» первого кластера называют величину, равную $(d2-d1)$.

Суть способа заключается в нахождении на иерархическом дереве кластеров максимального «жизненного цикла». Количество кластеров, существующих одновременно в течение него, и

является оптимальным. При этом величиной порога для «среза» кластерного дерева может быть любое значение из найденного «жизненного цикла».

Данный способ прост в реализации, однако он порождает следующую проблему: невозможно определить «жизненный цикл» самого крупного кластера. Ведь существует вариант, что разбивать область локации на кластеры не следует вовсе, определив все узлы в один кластер.

Отчасти решением данной проблемы является введение некоторой пороговой величины, которая бы определяла, выполнить разбиение в данном конкретном случае или нет. В качестве такой величины может быть принята, например, половина высоты дерева кластеров. Если максимальный «жизненный цикл», найденный на дендрограмме (графическом изображении дерева кластеров), превышает это значение, то принимается решение о разбиении. В противном

случае разбиение не производится.

Второй способ оперирует не высотой кластерного дерева, а значениями коэффициента неоднородности [10].

В данном случае каждая связь иерархического кластерного дерева получает в соответствие значение коэффициента неоднородности, определяемое как разница высоты самой связи и средней высоты связей, лежащих на нижних уровнях иерархии, скорректированная делением на стандартное отклонение. Чем больше это значение, тем существенней различие в кластерах, объединяемых связью. Чем меньше, - тем выше сходство между кластерами.

Выбираются две связи с наибольшими значениями коэффициента неоднородности, и вычисляется разница между ними. Если эта разница превышает заданную пороговую величину, то принимается решение о разбиении на кластеры. «Линия отсечения» проводится на дендрограмме между уровнем с максимальным значением коэффициента и ближайшим снизу уровнем иерархии. В противном случае разбиение не производится, и все узлы определяются в единый кластер.

Третий способ основан на вычислении внутри- и межкластерных расстояний [11]. Здесь в расчет принимается только структура и характеристики исходного набора узлов.

Окончательное разбиение на кластеры R должно удовлетворять следующему условию:

$$\min d(C_i, C_j) > \max d(h(C_i), h(C_j)), \forall C_i, C_j \in R,$$

где $d(C_i, C_j)$ – расстояние между парой узлов кластеров C_i и C_j ; $d(h(C_i), h(C_j))$ – расстояние между узлами одного кластера.

Иначе говоря, при окончательном разбиении различие между каждой парой кластеров должно быть больше, чем «самоподобие» каждого из них.

Для того чтобы определить такое разбиение

требуется просмотреть все возможные разбиения иерархического дерева. Их количество равно $(m-1)!$, где m – число узлов исходного набора. Таким образом, на больших объемах данных применение данного способа может вызвать серьезные затруднения, связанные с высокой трудоемкостью.

Отчасти проблему можно решить, если рассматривать только N последних разбиений, т.е. ситуации с количеством кластеров, равным $N, N-1, \dots, 2, 1$. Это позволит уменьшить время определения окончательного разбиения, не теряя при этом важной информации. Однако в этом случае на долю исследователя выпадает определения числа N .

Следует отметить, что первые два из описанных способов позволяют настраивать «строгость» фильтрации, изменяя пороговую величину разбиения: стимулировать алгоритм либо к выделению кластеров, либо, напротив, к отнесению всех данных в единую группу.

Иерархическая кластеризация позволяет сократить избыточность узлов в области локации для аппроксимации трехмерной модели трещиноватости РЛСБ по методу триангуляции Делоне. При этом на трехмерном графике, изображающем модель трещины, строятся треугольные фрагменты поверхностей, проходящих через три «ключевые» точки, а объединение фрагментов образует окончательную пространственную модель трещиноватости.

Для устранения выбросов перед построением модели выполняется медианная фильтрация «ключевых» точек.

Результаты применения трех способов иерархического кластерного анализа приведены на рисунках 5 - 10. На рисунках с нечетными номерами даны модели трещиноватости области локации размером 512×512 м². На рисунках с четными номерами даны укрупненные модели центральной четверти области локации.

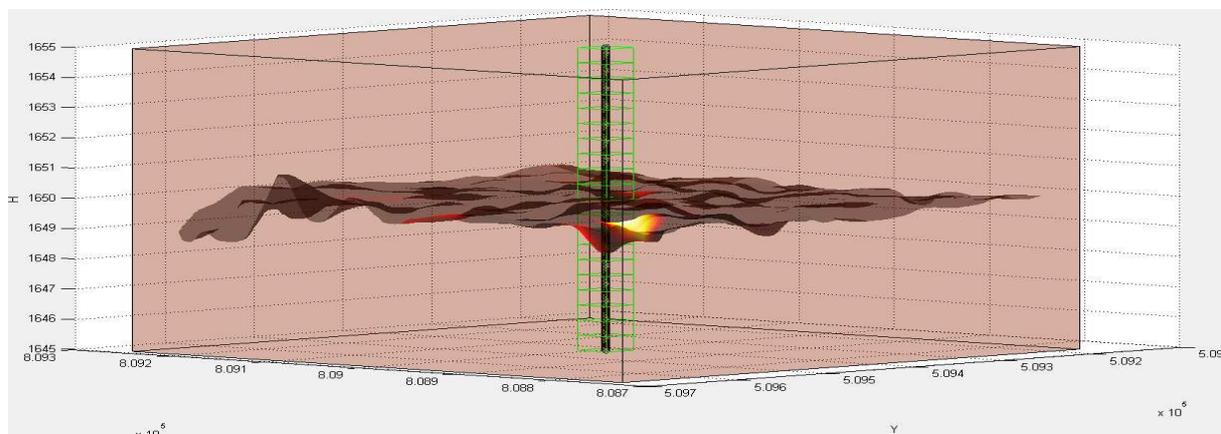


Рис. 5. Способ «жизненный цикл»

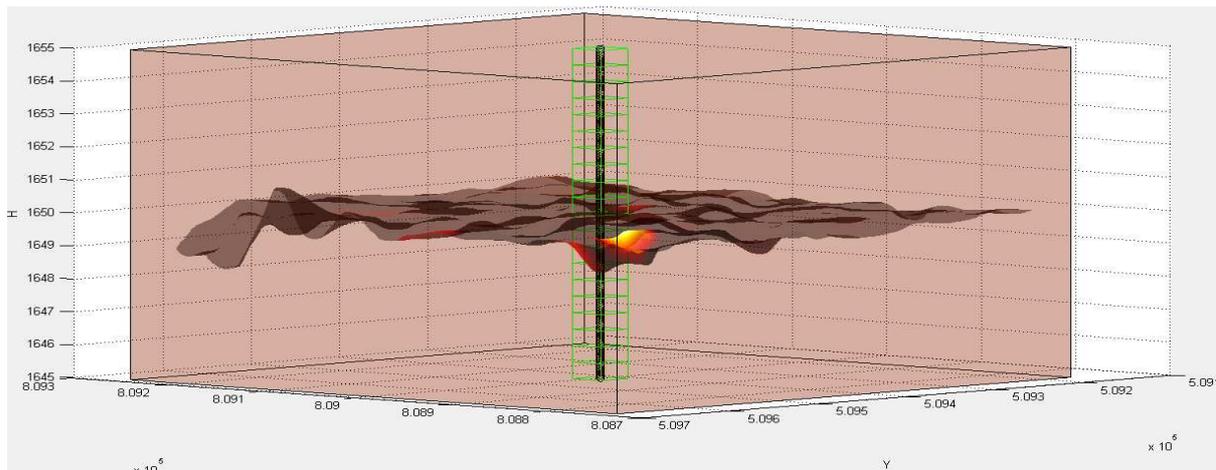


Рис. 6. Способ «жизненный цикл». Фрагмент

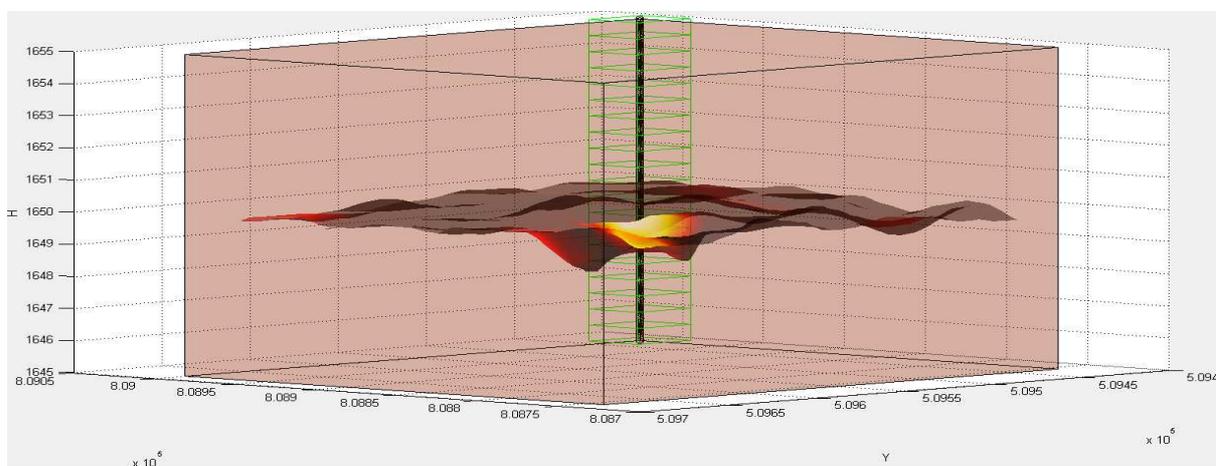


Рис. 7. Способ «коэффициент неоднородности»

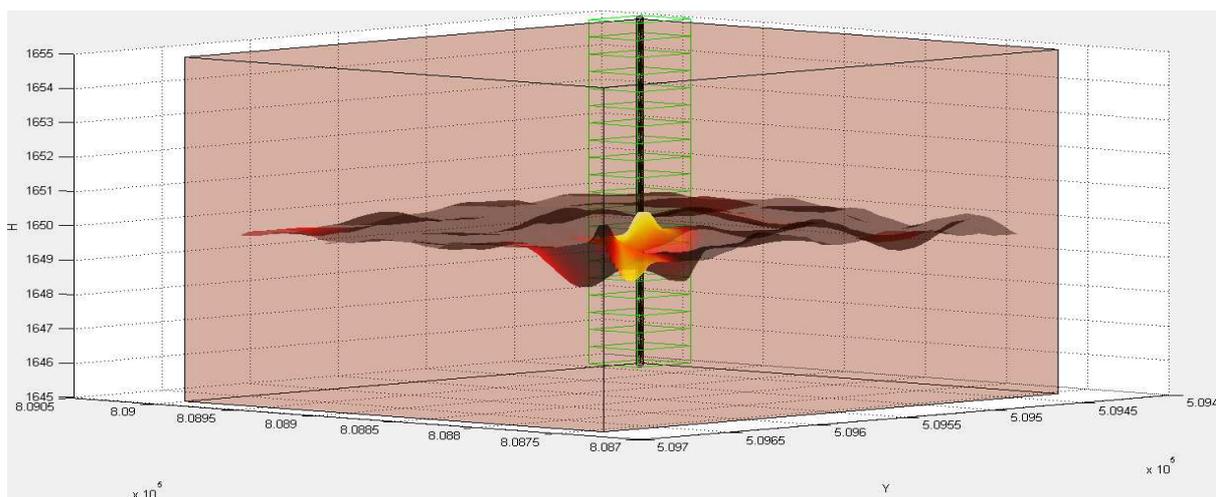


Рис. 8. Способ «коэффициент неоднородности». Фрагмент

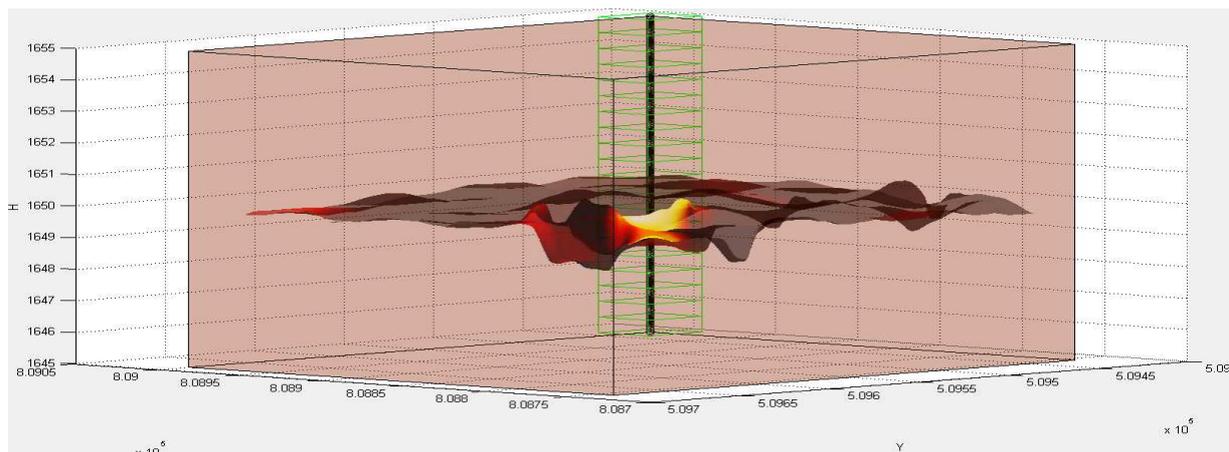


Рис. 9. Способ «внутри- и межкластерных расстояний»

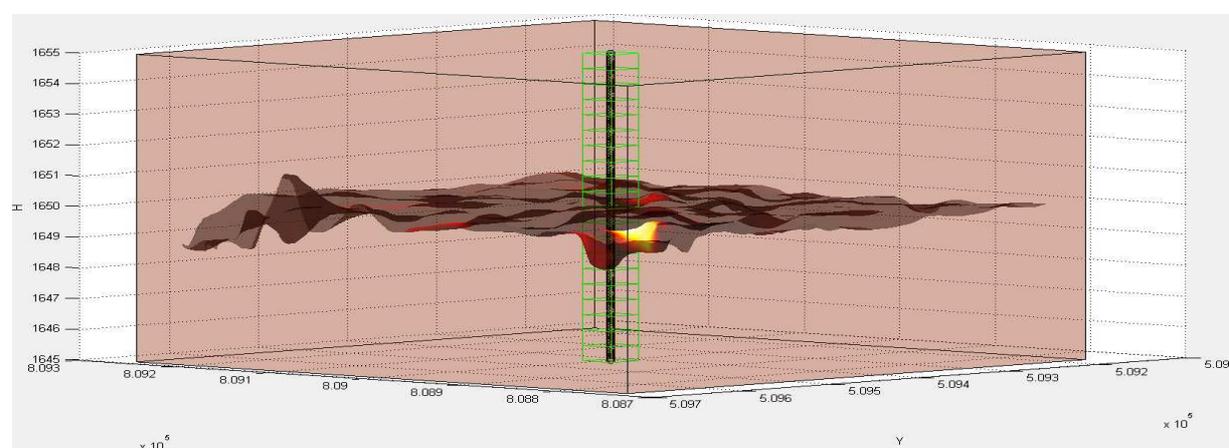


Рис. 10. Способ «внутри- и межкластерных расстояний». Фрагмент

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложена и построена трехмерная модель зоны трещиноватости продуктивного пласта при проведении ГРП. Модель названа «распрямым листом смятой бумаги» РЛСБ.

Использовались полевые данные мониторинга ГРП, проведенного с помощью локаций микросейсмических сигналов наземной нерегулярной системой приема.

Для устранения чрезмерной избыточности исходных данных локация была применена оригинальная пространственная фильтрация, основанная на трех методах агломеративной иерархической кластеризации.

При визуализации модели РЛСБ использовался метод триангуляции Делоне.

Выполнена программная симуляция, подтвердившая достоверность результатов моделирования зоны трещиноватости пласта.

5. БЛАГОДАРНОСТИ

Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Желтов Ю. П. Механика нефтегазоносного пласта / – М.: Недра, 1975. – 217 с.
- [2] Ю. Л. Новаковский, Е. В. Рабинович, А. С. Туркин. Определение размеров закрепленных трещин, образующихся при гидравлическом разрыве пласта // Экспозиция Нефть Газ. – 2012. - №4. – С. 95 – 97.
- [3] Ильинский А.Д. Локация очагов микроземлетрясений при пассивном сейсмическом мониторинге гидроразрыва пласта / А.Д. Ильинский, М.А. Краснова // Сейсмические приборы. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 14-40.
- [4] Mahrer K.D. Hydraulic fracture height in cased wells // Geoprospection, [Pap.] Int. Symp. Borehole Geophys. Petrol., Hydrogeol., Min. and Eng Appl. – 1991. – V. 28. – P. 221-250.
- [5] Рабинович Е. В., Новаковский А. Ю. Сейсмическая измерительная система для локализации трещин при гидроразрыве нефтяного пласта. // Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов (состояние, перспективы развития): Сборник материалов конференции. - 2009. – С. 171 - 174.
- [6] Е. В. Рабинович, А. С. Туркин, Ю. Л. Новаковский.

Наземная локация микросейсмических сигналов для мониторинга гидравлического разрыва пласта // Доклады ТУСУР. - 2012. - № 1(25). - Ч. 1. с. 104-112.

[7] Николенко С. И. Алгоритмы кластеризации / Машинное обучение – ИТМО, 2006. – // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://logic.pdmi.ras.ru/~sergey/teaching/ml/11-cluster.pdf>, свободный (дата обращения: 14.05.2012).

[8] Воронцов К. В. Лекции по алгоритмам кластеризации и многомерного шкалирования / Машинное обучение –2010. – // [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://www.machinelearning.ru/wiki/images/c/ca/Voron-ML-Clustering.pdf>, свободный (дата обращения: 14.05.2012).

[9] Fred L. N. Combining Multiple Clusterings Using Evidence Accumulation / L. N. Fred, A. K. Jain. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2005. – Vol. 27, No. 6. – p. 7-11.

[10] Bailey M. Automated Classification and Analysis of Internet Malware / M. Bailey, J. Oberheide, J. Andersen. // Recent Advances in Intrusion Detection. – 2007. – pp. 188-194.

[11] Theodoridis S. Pattern Recognition / S. Theodoridis, K. Koutroumbas. - Academic Press, Inc. USA, 2009. – 494 pp.



Рабинович Евгений Владимирович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Вычислительная техника» НГТУ и кафедры «Вычислительные системы» СибГУТИ. Область научных интересов и компетенций – цифровая обработка сигналов и моделирование нелинейных динамических систем. Автор более 80 научных статей и 7

учебных пособий.

E-mail: Erabinovich1952@gmail.com



Вайнмастер Павел Иванович, магистр кафедры «Вычислительная техника» НГТУ. Автор 3 научных статей. Область научных интересов и компетенций - цифровая обработка сигналов.

E-mail: wmaster91@mail.ru



Новиковский Юрий Леонидович, директор ЗАО НПП «СИБНЕФТЕГАЗ». Область научных интересов и компетенций – прикладные геофизические исследования. Автор более 10 публикаций и 2 патентов РФ.

E-mail: sog@ngs.ru

Оптоэлектронная измерительно-информационная система для обнаружения усилий плотин

Б.Н. Рахимов

Ташкентской университет информационной технологий, Республика Узбекистан

Аннотация. В данной работе изложены методика и приведены результаты экспериментального исследования механических характеристик волоконных световодов (ВС), с целью использования в качестве датчика для обнаружения усилий плотин.

Ключевые слова: полупроводниковый светоизлучающий диод (СИД), лазерный диод (ЛД), приёмник оптического излучения (ПОИ), волоконные световоды, оптоэлектронная система.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разрабатываются средства мониторинга физико-химического состояния различных материалов и технологических процессов. Этими средствами обеспечивается регулярное целенаправленное получение объективной информации об условиях эксплуатации технических объектов и дифференцированный учет расходования их ресурса. Самым массовым (благодаря сравнительной простоте и дешевизне) средством мониторинга могут стать оптоэлектронные системы на основе полупроводниковых светоизлучающих диодов (СИД), лазерных диодов (ЛД), приёмников оптического излучения (ПОИ) и волоконных световодов (ВС).

Технология оптоволоконных датчиков явилась результатом бурного развития оптоэлектронной промышленности и оптоволоконной связи в течение двух последних десятилетий. Доступность оптических компонент: источников и приемников оптического излучения (имеющих высокое качество и малую стоимость), специализированных оптических волокон и т. п. стали ключевыми факторами при разработке оптоволоконных датчиков. Оптические волокна стали объектом интереса со стороны специалистов ввиду того, что они обладают рядом характерных свойств, которые делают их идеальными для применения в качестве датчиков [1, 2]. Размеры и вес таких волокон очень малы (диаметр равен 125-250 мкм). Геометрическая форма может быть практически любой. Благодаря малой толщине и большой длине стеклянных волокон, их легко интегрировать практически в любую конструкцию, выполненную из пластмассы и армированную волокнами, без существенного

негативного влияния на механические свойства. Оптические волокна могут выдерживать относительно высокие эксплуатационные значения температуры и давления – двух важных параметров, которые являются определяющими для ряда технологий изготовления конструкций из композиционных материалов. Более того, волокна относительно нечувствительны (либо могут быть сделаны относительно нечувствительными, если использовать определенные методы укладки) к влиянию коррозии и усталостных нагрузок. По своей природе стеклянные волокна являются пассивным диэлектриком и поэтому могут применяться без опасения искрообразования. Они не образуют токопроводящие контуры на поверхности или внутри конструкции. Это свойство может быть, в частности, полезно в практических приложениях метода применительно к изделиям авиационной и космической промышленности, где для предотвращения опасности возникновения электрических разрядов, таких как удар молнии, требуется устранить из конструкции токопроводящие контуры. Сигнал, проходящий по оптическому волокну, в высшей степени нечувствителен к вредным электромагнитным воздействиям. Соответственно, отпадает необходимость применения дорогостоящего и громоздкого электромагнитного экранирования даже в тех местах, где имеются источники сильного электромагнитного излучения (например, в силовых установках). Оптические волокна имеют достаточно широкую полосу пропускания сигнала, что позволяет использовать их в большом количестве применений. Они также могут одновременно выполнять функции датчика и проводника сигнала измерений (оптоволоконные каналы передачи данных). Применяя метод мультиплексирования, можно размещать несколько датчиков в одном оптическом волокне.

Оптоволоконные датчики выбраны в качестве заменителя датчиков существующих типов. При этом применение стеклянных волокон позволяет пользователю значительно улучшить характеристики, надежность, безопасность продукции и (или) получить экономическую выгоду. Одновременно развиваются совершенно новые области

применения оптоволоконных датчиков. В тех случаях, когда планируется прямая замена старых типов датчиков на новые, необходимо убедиться в том, что новые приобретаемые положительные свойства оптоволоконных датчиков будут достаточно весомыми по сравнению со свойствами датчиков, которые заказчик хорошо знает.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО МЕТОДА ОБНАРУЖЕНИЯ УСИЛИЙ ПЛОТНИН

Одним из перспективных применений ВС в мониторинге строительных конструкций можно считать получение критериев, по которым оператор создаваемой системы мониторинга может делать вывод о надежности контролируемой конструкции, и, соответственно, об уровне безопасности.

В отличие от других методов (акустического, тензометрического и т. п.) оптоэлектронные

системы с применением ВС позволяют проводить контроль по сколь угодно сложной конструкции, могут быть внедрены внутрь железобетонных изделий.

Для проведения исследований нами была разработана и изготовлена экспериментальная установка, приведения на *рис. 1*.

Установка содержит блок питания (БП), из которого через переменный резистор R , ток подается на СИД. В качестве СИД использован светодиód АЛ-107Б мощностью излучения до 10 мВт и длиной волны 0,85–1,2 мкм. Излучение СИД через разъем подается на исследуемое оптоволокно, и далее через разъем на оптический кабель. Из оптического кабеля через разъем световой поток попадает на светочувствительную поверхность ПОИ. В качестве ПОИ использован фотодиод ФД-11К. Сигнал с ПОИ регистрируется в оптическом тестере (ОТ) [3-5].

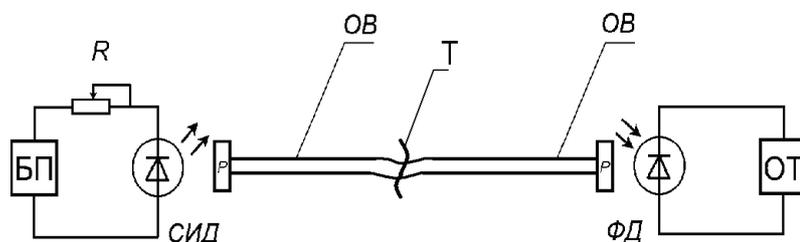


Рис.1. Схема экспериментальной установки: БП – блок питания; R – регулировочный резистор; СИД – светоизлучающий диод; Т-трещины; ОВ – оптоволокно; ОК – оптический кабель; ФД – фотодиод; ОТ – оптический тестер

С точки зрения контролируемых параметров экспериментальные исследования были направлены на изучение следующих параметров:

- деформации (растяжение, сжатие);
- перемещения;
- трещинообразования;
- предразрушения.

Спектр отражения такого «внутри-волоконного» интерферометра содержит спектральные интерферометрические полосы, расстояние между которыми определяются длиной интерферометра, а их спектральное положение зависит от эффективного коэффициента преломления сердцевинки волокна на участке между трещинами. При изгибе волокна коэффициент преломления сердцевинки волокна будет изменяться за счет термооптического эффекта, что вызовет движение интерференционных полос. В эксперименте использован когерентный полупроводниковый лазер для измерения отражения света с фиксированной длиной

волны от сформированного интерферометра. Интерферометр регистрировал периодические колебания интенсивности отраженного света, порождаемые трещинами волокна и сдвигом спектра отражения. Сигнал с фотодетектора регистрировался на оптическом тестере. На *рис. 2*. Приведена схема разработанного макета гидроэлектростанции для проведения измерений [6-9]. На этом рисунке 1- макет дамбы гидроэлектростанции; 2- трещины; 3- ВОК; 4-оптический тестер.

С помощью этого макета были проведены измерения интенсивности оптического сигнала в зависимости от размеров трещин на дамбе.

При 10 мм трещин, затухания ВОК при предразрушения показана 40,8 дБ на оптическом тестере. Таблица 1.

При трещинах размером 15 мм затухание ВОК при предразрушения зафиксировано как 41,4 дБ на оптическом тестере. При трещинах размером 25 мм эта величина достигает 42,9 дБ, а при трещинах в 30 мм - 43,8 дБ.

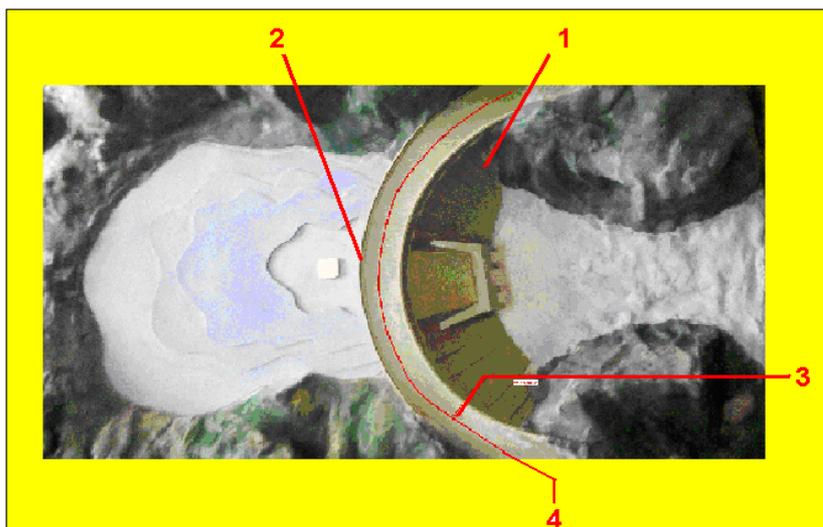


Рис.2. Экспериментальной макетный образец для снятия характеристики: 1- объектов гидроэлектростанции (в том числе и дамбах), 2- трещины, высокой усталостной прочностью. 3 - волоконно-оптический кабель. 4 - тестер «FDD 1203A OPTICAL TESTER»

Таблица.1. Затухания ВОК в зависимости от размеров трещин.

№	Размер трещины (мм)	0 мм	10 мм	15 мм	25 мм	30 мм
1	Затухания ВОК	40,50	40,80	41,40	42,90	43,80
2	Затухания ВОК	40,60	40,82	41,54	42,98	43,90
3	Затухания ВОК	40,65	40,85	41,70	43,10	44,00
	Ср.показателя	40,58	40,83	41,55	42,99	43,90



Рис.3. Тестер «FDD 1203A OPTICAL TESTER»

В наших исследованиях в основном используются полимерные ВС. Они имеют малый удельный вес, большую гибкость при относительно большом диаметре, механическую прочность, высокую технологичность. Достигнутое минимальное затухание при длине волны 0,66 мкм – 20 дБ/км.

Технические характеристики некоторых типов полимерных оптических волокон исследованы достаточно полно [1-4] и на их основе разработан способ определения мест предразрушения конструкций [5].

Принцип работы системы следующий. ОВ с отражающим концом внедряются внутрь железобетонных изделий. Генератор электрических импульсов вырабатывает

короткие ≈ 10 нс импульсы, которые подаются на ЛД. В качестве ЛД использован ИЛПИ-301-1 с длиной волны 0,81...0,89 мкм. В качестве контролируемой аппаратуры предлагается применение оптического импульсного рефлектометра. Результаты измерений характеризуются высокой повторяемостью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, благодаря новым разработкам в физике твердого тела и волоконной оптике и существенному снижению стоимости оптического волокна и полупроводниковых приборов стало возможным широкое применение датчиков на основе оптического волокна.

Проведены исследования по обнаружению механических повреждений различных конструкций (плотин, мосты, гражданские сооружения) с использованием оптического волокна. В результате мониторинга механических конструкций отрабатывается методика применения интерферометрических измерений.

Abstract. This paper outlines the methodology and the results of experimental research of mechanical characteristics of fiber light guide (Sun), for use as a sensor for detection of dams.

Keywords: solid-state light-emitting diode, laser diode, receiver of optical radiation and fiber light guide and optoelectronic system.

ЛИТЕРАТУРА

[1] J.R. Vinson and R.L. Sierakowski, "Поведение конструкций, образованных из композиционных материалов", Martinus Nijhoff Publishers, 1986.

[2] Публикации веб-сайта Комиссии по безопасности на транспорте США (NTSB) www.nts.gov.

[3] Оптоэлектронные преобразователи и устройства отображения информации: Сб. научн. тр. – М.: МАИ, 1983, 82 с.

[4] Волоконно-оптические датчики. Под ред. Т. Окоси. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 256 с.

[5] Ямамото Хисааки. Опволоконные датчики и их применение. // Отомэсэн. Automation. – 1987. – Vol.32, № 5. – С.31-35.

[6] Ржавин Ю.И. Волоконно-оптические датчики: технические и рыночные тенденции. / НТЖ. Измерительная техника. – 2003, № 10, С. 24-26.

[7] Рахимов Б.Н., Рахимов Н.Р. Оптоэлектронная измерительно-информационная система для обнаружения усилий железобетонных изделий / Прикладная оптика. PDF. СП(б). 2008. С. 246.

[8] Рахимов Б.Н. и др. Оптоэлектронные измерительно-информационные системы для выявления деформации, силы (давления) и предразрушения в элементах механических конструкций. Международной научно-технической конференции. МГУ геодезии и картографии. 25-27 мая 2009 г. Москва.

[9] T.D. Radjabov, B.N. Rakhimov, D.A. Davronbekov. Optoelectronic devices for automatic diagnosis of the physical properties of mechanical disturbances, damage dams / WCIS-2012. Tashkent.



Бахтиёржон Нематович Рахимов - старший научный сотрудник (докторант) кафедры Устройства и системы радиосвязи Ташкентской университет информационной технологий, автор более 30 научных трудов в т.ч. 4 изобретений. Область научных интересов и компетенций – оптоэлектронное приборостроение, оптимизация, многофункциональные системы.

E-mail: brah2008@rambler.ru

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

Содержание раздела:

- Вичугова А.А., Вичугов В.Н., Цапко Г.П. Согласование технических документов в информационных системах управления данными. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 67–71. ФГБОУ ВПО НТ ТПУ (Томск, Россия).
- Скороспешкин М.В., Скороспешкин В.Н. Цифровой адаптивный регулятор для объектов управления третьего порядка. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 72–74. ФГБОУ ВПО НТ ТПУ (Томск, Россия).
- Альсова О. К., Ускова К. С. Программная система кластерного анализа данных смешанного типа. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 75–81. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Ескин А.В., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Реализация дистанционного управления по радиоканалу Bluetooth платформой, моделирующей работу роботизированных средств. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 82–87. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Ескин А.В., Жмудь В.А., Трубин В.Г. Построение платформы моделирующей работу роботизированных средств на базе конструктора Lego Mindstorms NXT 2.0 в части управления электродвигателями. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 88–94. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).
- Басыня Е. А., Гунько А. В. Интеллектуально-адаптивные методы обеспечения информационной сетевой безопасности. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 95–97. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).

Согласование технических документов в информационных системах управления данными

А.А. Вичугова, В.Н. Вичугов, Г.П. Цанко
Томский политехнический университет
E-mail: anya@aics.ru

Аннотация: Рассмотрены информационные системы управления данными категории PDM на примере PDM-системы *Enovia SmarTeam*. Описан процесс согласования документов и его реализация. Предложено использовать положения теории распараллеливания и синхронизации операций для распределения задач между исполнителями. Выполнена разработка алгоритмического базиса в виде UML-диаграмм для создания программного обеспечения, существенно расширяющего типовые функциональные возможности PDM-системы.

Ключевые слова: Информационные системы, электронный документооборот, проектирование программного обеспечения.

ВВЕДЕНИЕ

Высокие требования к надежности высокотехнологичной продукции обуславливают особый порядок разработки технических документов, регламентирующих ее проектирование и производство. Особое внимание при этом уделяется процессам проверки и согласования технических документов.

В настоящее время внедрение информационных систем (ИС) электронного документооборота становится все более востребованным на отечественных предприятиях различных отраслях промышленности. Документы представляют собой объекты выражения данных и являются самым распространенным средством сопровождения работ, обеспечивая фиксацию и перенос информации от одного исполнителя к другому.

Сегодня принято выделять следующие категории информационных систем, позволяющих автоматизировать управление данными позволяют ИС:

- PDM (от англ. *Product Data Management* – управление данными о продукции);
- ECM (от англ. *Electronic Content Management* – управление электронными данными).

ИС указанных категорий являются многопользовательскими и поддерживают одновременную работу нескольких человек с одним документом, сохраняя при этом единство и целостность данных за счет наличия инструментов гибкой настройки прав пользователей согласно их ролям и полномочиям. Также полезной функцией PDM- и ECM-систем является возможность существования нескольких версий документа.

Однако, помимо ECM-функционала по управлению офисной документацией, PDM-системы обеспечивают просмотр и оперативную правку файлов различных инженерных форматов (CAD/CAE/CAM), а также выполнение других специфических операций, например, формирование спецификаций и т. д. Для этого многие PDM-системы интегрированы с широко используемыми CAD/CAE/CAM-пакетами, например, *Windchill* и *Pro/ENGINEER*; *Enovia SmarTeam* и *CATIA*, *AutoCAD*, *SolidWorks*, *DELMIA*; *Teamcenter* и *NX*, *Solid Edge*, *Tecnomatix* и т. д. Это особенно важно в случае проверки технической документации, содержащей множество специфической графики и математических выражений.

В свою очередь, ECM-системы позволяют автоматизировать текущую операционную деятельность: работу делопроизводителей, секретарей и руководителей, связанную с планированием и протоколированием совещаний, вынесением резолюций и поручений, а также канцелярские операции, включая обработку и учет входящих/исходящих документов. Это подтверждается обилием интеграционных решений с офисными приложениями семейства *Microsoft Office* и *Open Office*, а также программами типа «органайзер», например, *MS Outlook* и т. д. [2].

В связи с различным функциональным приложением PDM- и ECM-систем управление документами в них реализуется по-разному. В частности, отличается один из наиболее важных процессов управления документами – их согласование.

В бумажном документообороте согласование

реализуется с помощью подписи согласующего лица. Подпись электронного документа выполняется с использованием электронной подписи (ЭП), представляющей собой набор знаков, генерируемый по алгоритму. При помощи ЭП можно подписывать отдельные файлы или фрагменты баз данных. ЭП реализуется внешней по отношению к СУД специализированной программой, сертифицированной ФАПСИ/ФСБ, например, такой как продукты серии КРИПТОН/*Crypton*, *Sbersign*, средства цифровой подписи *Microsoft Windows*, *КАРМА* и т.д. После того, как документ подписан ЭП, он не подлежит изменению. Однако, в связи с повышенной важностью технических документов процесс их согласования является нелинейным с изменяемыми параметрами, такими как число согласующих лиц, последовательное или параллельное выполнение и т.д.

АНАЛИЗ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОГЛАСОВАНИЯ ДОКУМЕНТОВ

Фактически, согласование документов представляет собой процесс из следующих действий:

- задание параметров согласования (определение срока выполнения работы, перечня согласующих лиц и их последовательность);
- проверка документа каждым согласующим лицом;
- изменение свойств документа, которые отражают результаты его проверки и характеризуют статус согласованности.

Таким образом, согласование представляет собой последовательность действий, которая выполняется по определенному алгоритму или маршруту. В терминологии современных ИС маршрут прохождения данных принято называть бизнес-процессом или потоком работ. Наиболее распространенным считается англоязычный термин *Workflow*, в основе которого лежит *IDEF3*-методология структурного анализа. Визуальная нотация *Workflow* представляет собой описание логической последовательности действий с помощью графических элементов.

Рассматривая методологию *Workflow* в терминах теории графов, следует отметить, что поток работ представляет собой ориентированный граф – последовательность вершин (узлов) и направленных связей между ними. Узел является ключевой точкой бизнес-процесса, в которой задаются параметры работы (исполнитель, контроллер, сроки и т. д.). Для определения направления движения потока работ от одного узла к другому используется стрелка с надписью, указывающей действие, которое будет выполняться (возврат к предыдущему либо переход к следующему узлу).

Для отражения сложного характера реальной деятельности в линейном порядке расположения

узлов на диаграмме *Workflow* необходимо свести к минимуму сложные логические ветвления. Следует стремиться представить деятельность как взаимосвязанную совокупность инкапсулированных друг в друга процессов, число узлов в которых уменьшается по мере вложенности. Подобное упрощение приводит к элементарному процессу с единственным узлом – заданием для одного исполнителя.

Применяя вышеизложенные положения к задаче согласования технических документов, следует отметить, что операция проверки документа должна выполняться параллельно несколькими пользователями ИС. Поэтому возникает необходимость распараллеливания операций пользователей по работе с документом (его просмотр и изменение статуса согласованности).

В настоящее время теоретические и прикладные исследования в области распараллеливания и синхронизации операций наиболее развиты в сфере разработки операционных систем и многопроцессорных вычислений. Однако концептуальные положения данной теории могут быть использованы и для решения рассматриваемой задачи согласования документов в ИС управления данными.

Согласно [3], идея распараллеливания операций основана на том, что большинство задач может быть разделено на набор меньших задач, которые могут быть решены одновременно. Как правило, параллельные вычисления требуют координации действий, которая называется синхронизацией.

Синхронизация процессов представляет собой приведение двух или нескольких процессов к такому их протеканию, когда конкретные стадии разных процессов совершаются в определенном порядке, либо одновременно. Синхронизация требуется в любых случаях, когда параллельно протекающим процессам необходимо взаимодействовать. Таким образом, процесс согласования документа детализируется на множество дочерних элементарных заданий по числу исполнителей (согласующих лиц), что показано на *рис. 1*.

Результатом выполнения каждого из элементарных заданий (*рис. 1*) является отметка о согласовании документа данным исполнителем. Данная отметка может быть реализована в качестве значения «согласовано» или «не согласовано» в свойстве объекта элементарного задания по согласованию. После того, как все исполнители элементарных заданий их выполнили, необходимо синхронизировать результаты, т. е. проверить, что все участники процесса согласования поставили отметки «согласовано». Только в этом случае документ считается согласованным, и должно происходить автоматическое изменение его свойства, которое отражает статус согласованности.

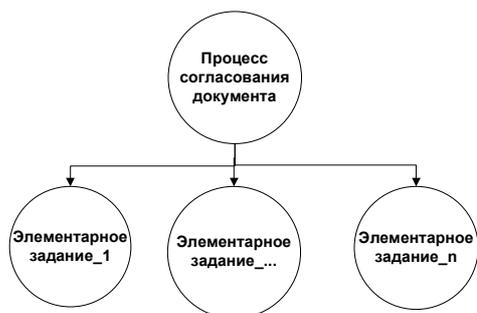


Рис. 1. Распараллеливание процесса согласования документа

Если документ не согласован кем-либо из исполнителей, то необходима его корректировка, создание его новой версии и загрузка в ИС управления данными. После этого новая версия документа вновь становится доступной всем согласующим лицам для просмотра и внесения замечаний. Все эти итерации совершаются в рамках единого процесса согласования документа. Когда, наконец, все замечания согласующих лиц устранены и документ согласован каждым из них, документ считается согласованным.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА СОГЛАСОВАНИЯ ДОКУМЕНТА

Для вышеописанного перемещения документов между исполнителями в *PDM Enovia SmartTeam* используется инструмент *Workflow*-диаграмм, который реализуется практически одинаково, несмотря на отличия рассматриваемых систем:

- средства администрирования позволяют создавать любые визуальные схемы маршрутов документов и сценариев работ;
- после разработки *Workflow*-диаграммы она тестируется и, при отсутствии ошибок, становится доступна для использования;
- в интерфейсе пользователя ИС выделено специальное хранилище порученных ему работ: например, приложение *SmartBox* в *PDM Enovia SmartTeam* и папки *Входящие/Исходящие* в *ECM DIRECTUM*.

На рис. 2 показаны примеры *Workflow*-диаграмм, разработанных в *PDM Enovia SmartTeam*.

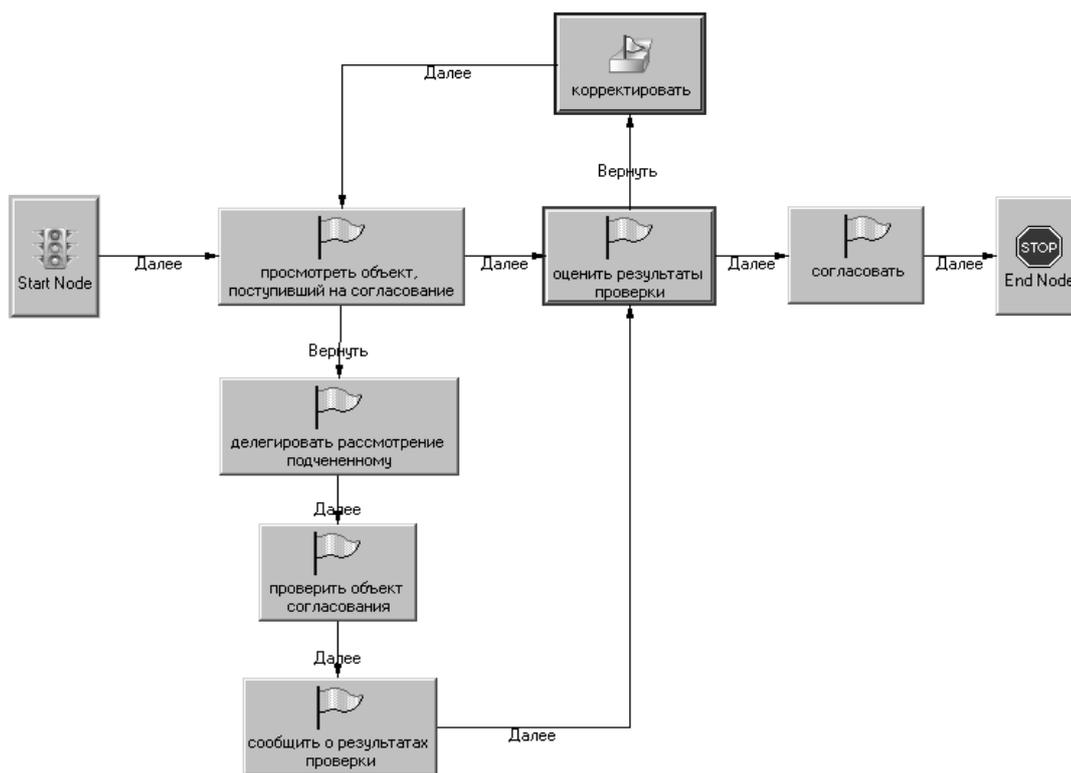


Рис. 2. Фрагмент *Workflow*-схемы процесса в *PDM Enovia SmartTeam*

Однако, существующие средства администрирования *Workflow*-диаграмм в *PDM Enovia SmartTeam* не позволяют выполнить автоматическое создание требуемого количества элементарных заданий по согласованию и их распараллеливание. Поэтому необходимо разработать дополнительное программное обеспечение, которое позволит осуществлять описанный порядок согласования документов, включая распараллеливание и синхронизацию

операций, а также автоматическое изменение статуса согласованности документа. Для этого, прежде всего, следует формализовать алгоритм действий с помощью соответствующих инструментов графического проектирования программных систем. Одним из наиболее часто используемых в сфере программной инженерии языков моделирования является *UML* (от англ. *Unify Modeling Language*), который предоставляет широкие возможности для разработки

алгоритмического базиса программного обеспечения и баз данных [4].

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМИЧЕСКОГО БАЗИСА ДЛЯ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ

Согласование технических документов является одним из видов работ, выполняемых пользователями ИИС в PDM-системе. В соответствии с объектно-ориентированным подходом для обозначения множества действий пользователя следует предусмотреть суперкласс «Работа», потомком которого будет базовый класс «Согласование». Поскольку число согласующих лиц и порядок их работы зависит от типа согласуемого объекта (ИМИ, КД), необходим класс-контейнер для хранения этих параметров согласования. Для этого предлагается класс «Задание параметров согласования», связанный с классом «Элементарное согласование».

Класс «Элементарное согласование» представляет собой элементарное задание на согласование, каждое из которых получает и

исполняет конкретное согласующее лицо. Экземпляры объектов класса «Элементарное согласование» создается столько, сколько согласующих лиц указал разработчик документа в экземпляре класса «Задание параметров на согласование». Если значение атрибута «статус элементарного согласования» у каждого из объектов класса «Элементарное согласование», связанных с согласуемым документом, истинно, то документ переходит в стадию ЖЦ «согласован», иначе документ является не согласованным. Операцию изменения атрибута «статус согласования» у объекта класса «Документ» случае запускает операция «изменить статус согласования» у класса «Запуск на согласование». В качестве согласуемого объекта может выступать экземпляр класса «Документ» (КД или ИМИ), который программным образом переходит в стадию ЖЦ «Согласована» в том случае, если все согласующие лица согласовали объект, т.е. элементарные задания на согласование выполнены со статусом «согласовано».

Предлагаемая структура классов для работ по согласованию документов представлена на рис. 3.

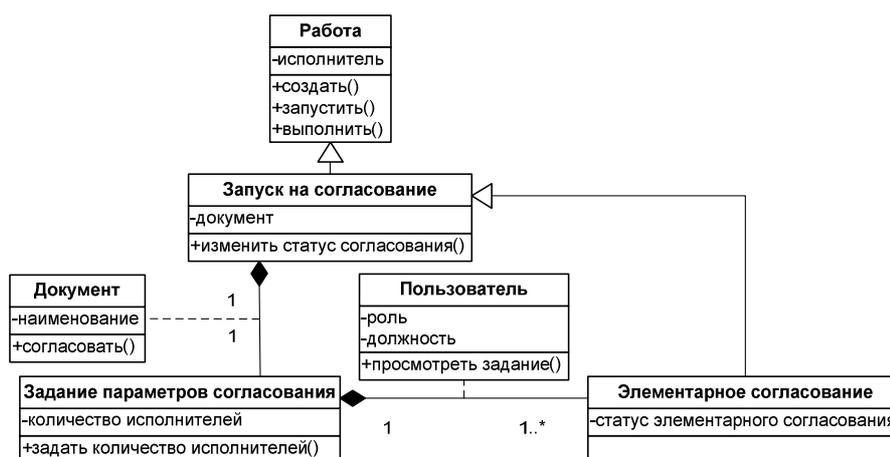


Рис. 3. UML-диаграмма классов действий пользователей ИИС в части согласования документов

На рис. 4 представлена UML-диаграмма последовательностей, которая иллюстрирует взаимодействие объектов класса «Работа» и пользователей ИИС при согласовании документов. В качестве акторов (независимых сущностей) показаны разработчик документа и согласующее лицо. Акторы являются пользователями СУД в рамках ИИС. Поскольку процесс проверки и элементарного согласования документа может выполняться несколько раз, он показан как множественное цикличное действие. После выполнения элементарного задания на согласование, объект этого класса становится

недоступным для изменения.

Программная реализация разработанных UML-диаграмм (рис. 3, 4) была выполнена с использованием внутреннего редактора программного кода PDM-системы *Enovia SmarTeam*, а также специализированной среды разработки MS Visual Studio 2010. Разработанное программное обеспечение существенно расширяет функциональные возможности рассмотренной PDM-системы и облегчает процесс параллельной работы с документами в части их согласования [5].

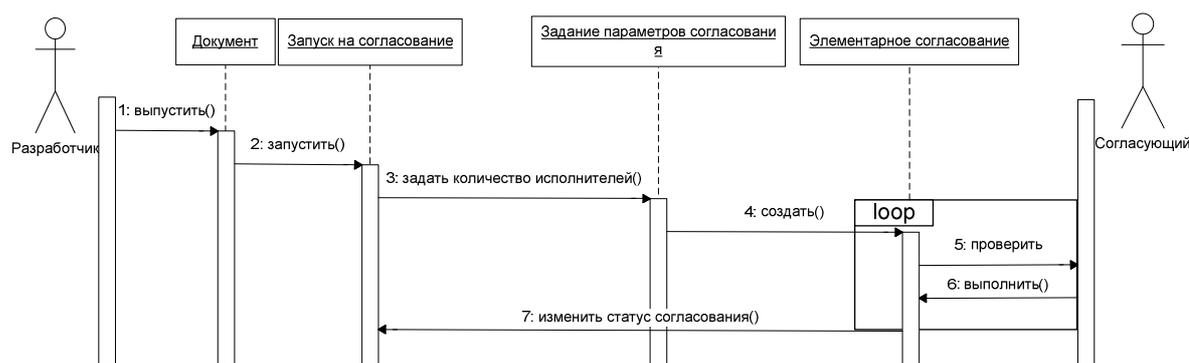


Рис. 4. UML-диаграмма классов действий пользователей ИИС в части согласования документов

URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/article/view/518/427>

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Процесс согласования технических документов является важным и итеративным действием, которое существенно облегчается с применением информационных систем управления данными при условии их соответствующей настройки. При отсутствии готовых решений по заданию собственных оригинальных маршрутов движения документов возникает задача расширения функциональных возможностей используемого программного средства. Для этого необходимо разработать алгоритмическую основу с применением теоретического базиса и соответствующих инструментов графического проектирования программных систем. Вышеперечисленные мероприятия показаны на примере процесса согласования технических документов с использованием положений теории распараллеливания и синхронизации операций в PDM-системе *Enovia SmartTeam*.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Вичугова А.А., Вичугов В.Н., Дмитриева Е.А., Цапко Г.П. Информационные технологии. – Томск: Изд-во ТПУ, 2011. – 84 с. URL: http://portal.tpu.ru/SHARED/v/VICHUGOVAAA/Tab/IK_Vichugova_informacionnye_tehnologii.pdf. (дата обращения: 17.08.2012).
- [2] Вичугова А.А., Вичугов В.Н., Дмитриева Е.А. Жизненный цикл документа в информационных системах управления данными // Вестник науки Сибири. Серия: Информационные технологии и системы управления. – 2011. – № 1. – С. 328–334. URL: <http://sjs.tpu.ru/journal/issue/view/2/showToc/sect/4> (дата обращения: 20.11.2012).
- [3] Таненбаум Э., Ванн Стеен М. Распределенные системы. Принципы и парадигмы. – СПб.: Изд-во Питер, 2003. – 877 с.
- [4] Фаулер М., Скотт К. UML. Основы. – СПб.: Изд-во Символ-Плюс, 2002. – 192 с.: ил.
- [5] А.А. Вичугова, В.Н. Вичугов, Е.А. Дмитриева, Г.П. Цапко. Особенности согласования документов с применением информационных систем управления данными [Электронный ресурс] // Вестник науки Сибири. Серия: Информационные технологии и системы управления. - 2012 - № 5(6) - С. 118-125. -



Вичугова Анна Александровна - ассистент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института Кибернетики Томского политехнического университета. Область научных интересов: бизнес-моделирование, структурный анализ, корпоративные информационные системы. E-mail: anya@aics.ru



Вичугов Владимир Николаевич - к.т.н., доцент кафедры автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики Томского политехнического университета. Область научных интересов: программирование, базы данных, автоматизированные системы управления. E-mail: vlad@aics.ru



Цапко Геннадий Павлович - д.т.н., профессор, заведующий кафедрой автоматизации и компьютерных систем Института кибернетики Томского политехнического университета. Область научных интересов: системный анализ, управление жизненным циклом продукции. E-mail: tsapko@aics.ru

Цифровой адаптивный регулятор для объектов управления третьего порядка

М.В. Скороспешкин, В.Н. Скороспешкин

ФГБОУ ВПО НИ ТПУ

Аннотация. Показана возможность создания цифрового адаптивного регулятора на базе цифрового оптимального регулятора и последовательного цифрового адаптивного корректора динамических характеристик систем автоматического регулирования с фазовым опережением. Установлено, что применение такого цифрового адаптивного регулятора позволяет существенно улучшить качество переходных процессов в системах автоматического регулирования нестационарными объектами. Сделан вывод о том, что такие системы целесообразно применять как при регулировании технологических параметров нестационарных объектов, так и при регулировании технологических параметров стационарных объектов, на которые поступают возмущения, приводящие к возникновению колебаний регулируемой величины с амплитудой, превышающей допустимую.

Ключевые слова: Цифровой регулятор, корректор динамических характеристик систем автоматического регулирования с фазовым опережением, качество регулирования, нестационарный объект регулирования.

В настоящее время реализация систем автоматического регулирования (САР) в большинстве случаев производится на базе промышленных микропроцессорных контроллеров, что позволяет осуществлять адаптивное регулирование.

Центральным вопросом, решаемым при разработке адаптивных систем управления, является выбор принципа адаптации и структуры системы. Используемый достаточно часто в составе адаптивной системы ПИД-регулятор не обеспечивает оптимального управления по критерию максимального быстродействия, и в этой связи актуальным является разработка цифровых адаптивных оптимальных регуляторов.

В настоящей работе предлагается реализация цифрового адаптивного регулятора на базе цифрового оптимального регулятора [1], дополненного последовательным цифровым адаптивным корректирующим устройством (корректором) динамических характеристик с фазовым опережением. Используемый

корректор представляет собой псевдолинейное корректирующее устройство, осуществляющее изменение фазовой частотной характеристики (ФЧХ) канала формирования управляющего воздействия при возникновении колебаний.

Структура системы с цифровым адаптивным регулятором представлена на рисунке 1.

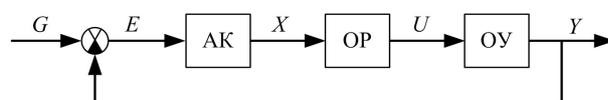


Рис. 1. Структура САР с цифровым адаптивным регулятором

На рисунке 1 использованы следующие обозначения: АК – цифровой адаптивный корректор; ОП – оптимальный регулятор; ОУ – объект управления; G – задающее воздействие; E – ошибка регулирования; X – выходной сигнал цифрового адаптивного корректора; U – управляющее воздействие; Y – выходная величина объекта управления.

Как показано в [1] для объекта управления с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{a}{p^2(p+b)} \quad (1)$$

оптимальный регулятор, обеспечивающий максимальное быстродействие и монотонный переходный процесс, имеет дискретную передаточную функцию:

$$W(z) = K_0 \cdot \frac{1+b_1 \cdot z^{-1} + b_2 \cdot z^{-2}}{1+a_1 \cdot z^{-1} + a_2 \cdot z^{-2}}, \quad (2)$$

$$\text{где } K_0 = \frac{b}{a \cdot h^2 \cdot (1-B)}, \quad b_1 = -(1+B),$$

$$b_2 = B, \quad a_1 = 1 - \frac{1}{b^2 \cdot h^2} + \frac{2-b \cdot h}{2 \cdot b \cdot h \cdot (1-B)},$$

$$a_2 = \frac{1 - (b \cdot h + 1 + \frac{1}{b^2 \cdot h^2}) \cdot B}{b^2 \cdot h^2 \cdot (1-B)}, \quad B = e^{-b \cdot h},$$

где h – такт управления.

Проведенные в среде MatLab исследования САР с данным регулятором показали его хорошую работоспособность лишь в небольшом диапазоне изменения параметров объекта управления. Для обеспечения работоспособности САР объектом с переменными параметрами, линейный оптимальный регулятор дополнен

псевдолинейным адаптивным корректором, совместно с которым реализуется нелинейный закон регулирования.

На рисунке 2 представлена структурная схема адаптивного корректора.

На рисунке 2 использованы следующие обозначения: БУС – блок усиления сигнала; МОД – блок выделения модуля; $W(z)$ – дискретная передаточная функция динамического звена; Sign – блок определения знака; БУ – блок умножения; БАА – блок анализа амплитуды ошибки САР; БК – блок коррекции параметра динамического звена; E – ошибка регулирования; E_1 – выходной сигнал блока выделения модуля; E_2 – выходной сигнал блока определения знака; X – выходной сигнал адаптивного корректора.

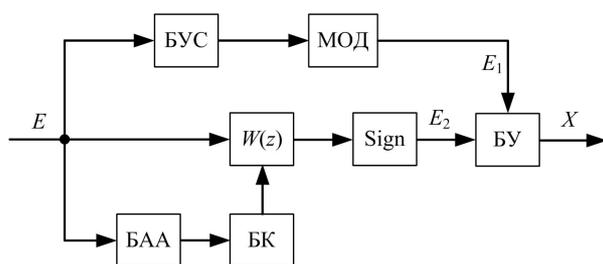


Рис. 2. Структурная схема адаптивного корректора

Данный корректор выполнен на базе псевдолинейного корректирующего устройства, описанного в [2].

В непрерывном варианте передаточная функция динамического звена, используемого в данном корректоре, имеет вид:

$$W(p) = \frac{T_1 p + 1}{T_2 p + 1}$$

Корректор осуществляет фазовый сдвиг, величина которого зависит от значения постоянных времени T_1 и T_2 . Входной сигнал корректора, разветвляясь, проходит по трем каналам. Верхний канал обеспечивает выделение абсолютного значения ошибки регулирования, средний канал состоит из интегро-дифференцирующего звена, блока определения знака и блока умножения. Нижний канал обеспечивает определение амплитуды колебаний ошибки на входе корректора и изменение фазового сдвига интегро-дифференцирующего звена путем коррекции постоянной времени T_1 . Сигнал на выходе корректора X равен произведению выходных сигналов верхнего E_1 и среднего E_2 каналов.

При возникновении в САР колебаний регулируемой величины, а следовательно, и ошибки, блок коррекции автоматически производит увеличение постоянной времени T_1 интегро-дифференцирующего звена, что приводит к подъёму ФЧХ и подавлению колебаний регулируемой величины.

Дискретная передаточная функция интегро-дифференцирующего звена, полученная на основе использования приближенного соотношения Тастина, имеет вид:

$$W(z) = \frac{(h-2T_1) \cdot z^{-1} + (2T_1+h)}{(h-2T_2) \cdot z^{-1} + (2T_2+h)}, \quad (3)$$

где T_1 и T_2 – постоянные времени интегро-дифференцирующего звена, h – такт управления.

Оптимальный регулятор, дискретная передаточная функция которого имеет вид (2), обеспечивает минимальное время переходного процесса без перерегулирования для указанного выше объекта третьего порядка при ступенчатом задающем воздействии. Для случая, когда в (1) $a=1$, $b=1$ была получена кривая переходного процесса на единичное ступенчатое воздействие. Данная кривая представлена на рисунке 3.

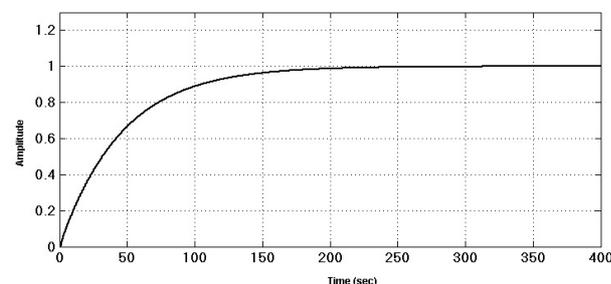


Рис. 3. Реакция САР на ступенчатое задающее воздействие

Характер кривой соответствует заданным требованиям по качеству переходного процесса САР с оптимальным регулятором для объекта с передаточной функцией (1). При изменении характеристик объекта управления данный оптимальный регулятор уже не обеспечивает монотонного переходного процесса.

Для улучшения качества переходного процесса в САР вводится последовательный цифровой адаптивный фазовый корректор, осуществляющий подъем ФЧХ при возникновении колебаний.

На рисунке 4 представлены кривые, характеризующие реакцию на единичное ступенчатое воздействие САР объектом третьего порядка с коэффициентом $b=0.01$, что соответствует изменению его свойств как нестационарного объекта.

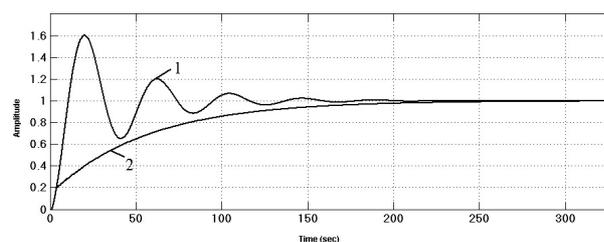


Рис. 4. Реакция САР на ступенчатое задающее воздействие

Кривая 1 на рисунке 4 соответствует САР с оптимальным регулятором без применения корректора, а кривая 2 – САР с оптимальным регулятором и описанным выше корректором.

Кривой 2, полученной в результате подстройки корректирующего устройства, соответствуют следующие параметры данного устройства: $T_1 = 60\text{с}$. $T_2 = 1\text{с}$. Характер переходных процессов в САР без корректора и с корректором свидетельствует о возможности повышения качества систем автоматического регулирования, реализованных на базе оптимального регулятора.

Результаты исследования САР с корректором с фазовым опережением, проведенные в среде MatLab, показали, что существенное улучшение качества переходных процессов в САР нестационарными объектами возможно путем изменения постоянных времени T_1 и T_2 интегро-дифференцирующего звена, используемого в составе псевдолинейного корректора, в зависимости от амплитуды колебаний ошибки регулирования. В блоке БАА происходит определение амплитуды колебаний ошибки. Если амплитуда превышает установленный порог, происходит увеличение соотношения постоянных времени T_1 и T_2 до тех пор, пока амплитуда не уменьшится и не станет меньше порогового значения. Изменение этого соотношения осуществляется блоком БК.

Исследования САР объектами управления с передаточными функциями:

$$W(p) = \frac{a}{(p+b)^3} \quad \text{и}$$

$$W(p) = \frac{a}{p(p+b)^2}$$

также показали эффективность предлагаемого цифрового адаптивного регулятора.

Результаты исследования САР с корректором, в котором происходит подстройка

путем подъема ФЧХ, показали, что такие системы целесообразно применять как при регулировании параметров нестационарных объектов, так и при регулировании параметров объектов, на которые поступают возмущения, приводящие к возникновению в САР колебаний регулируемой величины с амплитудой, превышающей допустимую. Используемый в представленной САР корректор обеспечивает подъем ФЧХ до 84 градусов. В тех случаях, когда необходимо обеспечить подъем ФЧХ на большую величину можно рекомендовать использование корректирующего устройства [3], обеспечивающего подъем ФЧХ до 175 градусов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гостев В.И. Системы управления с цифровыми регуляторами. Справочник. – К.: Техника, 1990. – 280 с.
 [2] Скороспешкин М.В. Адаптивные псевдолинейные корректоры динамических характеристик систем автоматического регулирования // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – №7. – С. 172 – 176.
 [3] Скороспешкин М.В., Скороспешкин В.Н. Псевдолинейное корректирующее устройство с фазовым опережением // Патент на полезную модель №104332 (RU 104332 U1) По заявке №2010149922/08 от 03.12.2010. Опубликовано: 10.05.2011 RU БИПМ №13.

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

Скороспешкин Владимир Николаевич – доцент кафедры автоматки и компьютерных систем Института кибернетики ФГБОУ ВПО НИ ТПУ, к.т.н.,
 e-mail: shedat@tpu.ru

Программная система кластерного анализа данных смешанного типа

Альсова О. К., Ускова К. С.
Novosibirsk State Technical University (NSTU)

Аннотация: В статье приведено описание структуры, функциональных возможностей, применения программной системы кластерного анализа данных смешанного типа *MixDC - Mixed Data Clustering*. В программной системе реализован комплекс как оригинальных, так и стандартных алгоритмов кластеризации данных смешанного типа и оценки обоснованности кластерных решений. Программная система может использоваться в разных предметных областях. Алгоритмы, представленные в *MixDC*, тестировались на реальных медицинских данных. Полученные результаты позволяют сделать вывод о перспективности использования программной системы, как средства решения задачи кластеризации данных смешанного типа.

Ключевые слова: кластерный анализ, данные смешанного типа, мера сходства, алгоритм кластеризации, программная система.

ВВЕДЕНИЕ

Кластерный анализ – это общее название множества вычислительных процедур, используемых при создании классификации. В результате работы с процедурами образуются «кластеры» или группы очень похожих объектов [1].

Кластеризация на сегодняшний день используется в самых разных предметных областях (медицина, экономика, социология и пр.) и является одной из основных задач интеллектуального анализа данных. Кластерный анализ применяется для обработки больших объемов информации, позволяет обнаружить в данных неизвестные ранее закономерности и представить их в удобной для пользователя форме.

Разработано множество методов и алгоритмов кластерного анализа данных. Однако применение большей части методов требует, чтобы описывающие объект признаки (на основе которых выполняется кластеризация) были количественного типа. Значительно меньше разработано методов, которые позволяют работать с качественными признаками в процессе кластеризации.

Наибольшую сложность при кластеризации объектов представляет обработка совокупности признаков смешанного типа (количественные и

качественные). В стандартном статистическом программном обеспечении (*Statistica, SPSS*) не реализованы алгоритмы кластеризации данных смешанного типа. Тогда как в реальных задачах, как правило, объект описывается совокупностью разнотипных признаков, причем при кластеризации необходимо учесть все признаки. Например, такая проблема характерна для обработки медицинских данных.

Еще одна ключевая проблема при кластеризации заключается в обосновании результатов кластерного анализа, для решения этой задачи разработан ряд подходов и алгоритмов, но не все проблемы решены, в пакетах прикладных программ не реализованы или крайне ограничено используются методы обоснования кластерного решения.

Кроме того, стандартное статистическое программное обеспечение (СПО) в основном ориентировано на профессионалов, трудно осваивается людьми, которые незнакомы с математической статистикой. В стандартном СПО не реализованы «интеллектуальные» функции, а, именно, описание результатов проведенного анализа, выдача пользователю рекомендаций на естественном языке и т.п.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является разработка системы кластерного анализа данных смешанного типа.

В соответствии с целью были поставлены следующие задачи:

1. Выбрать и модернизировать меры сходства.
2. Разработать оригинальные алгоритмы кластеризации.
3. Разработать структуру программной системы.
4. Реализовать программную систему кластерного анализа данных смешанного типа
5. Провести тестирование системы на реальных медицинских данных

Основное назначение системы – выполнение устойчивой кластеризации данных смешанного типа.

Предполагается реализация и частично уже реализованы следующие функции:

- обеспечение возможности ввода данных вручную пользователем;
- загрузка данных из файлов формата .xls, .csv;
- возможность одновременной работы с несколькими листами данных;

- выполнение кластерного анализа данных смешанного типа с использованием нескольких мер сходства и алгоритмов кластеризации;
- выдача рекомендаций относительно выбора алгоритма кластеризации;
- визуализация процесса кластеризации и результатов анализа в виде набора графиков;
- оценка обоснованности кластерных решений;
- выдача результатов кластеризации в удобном для пользователя виде, интерпретация кластерного решения;
- сохранение результатов в файл.

Процесс кластеризации средствами программной системы состоит из следующих основных этапов:

- загрузка исходной многомерной выборки данных;
- выбор множества признаков, на основе которых будет выполняться кластеризация;
- выбор меры сходства и алгоритма кластеризации;
- вычисление значений выбранной меры сходства между объектами;
- применение выбранного метода кластерного анализа для создания групп сходных объектов (кластеров);
- формирование набора признаков, которые статистически значимо влияют на результат кластеризации;
- повторная кластеризация объектов с использованием только значимых признаков;
- проверка достоверности результатов кластерного решения;

- визуализация, интерпретация результатов кластерного анализа, выдача рекомендаций пользователю.

В качестве средства разработки был выбран язык программирования *Java*. В *Java* имеется встроенная графическая библиотека для разработки интерфейсов, существуют библиотеки для работы с *xls* файлами (например, *JExcelAPI*), что является обязательным требованием, исходя из предполагаемых функций системы. Кроме того, *Java* является кроссплатформенным языком, что обеспечит возможность использование системы на компьютерах с любыми ОС.

2. СТРУКТУРА СИСТЕМЫ

Структура системы приведена на *рисунке 1*. Система кластерного анализа состоит из четырех основных блоков: блока анализа, блока кластеризации, средства оценки качества и интерпретации кластерного решения и средства визуализации. Рассмотрим назначение каждого из них. Блок анализа необходим для выполнения предварительного анализа исходных данных. А именно, перед началом кластеризации системе должны быть известны такие сведения как количество строк в таблице данных, количество переменных, тип каждой из них (количественный, порядковый или номинальный) и т.д. Все это выполняется на этапе предварительного анализа.



Рис. 1. Структура системы

Блок кластеризации используется для непосредственного распределения объектов по кластерам. В этом блоке производится

вычисление степени сходства между объектами/группами объектов. Метод вычисления сходства может быть разным в

зависимости от настроек системы. После того, как получена матрица сходства, блок кластеризации выполняет распределение объектов по кластерам. Выбор алгоритма кластеризации и его параметров осуществляется пользователем в настройках системы. Планируется реализация различных типов алгоритмов кластерного анализа данных.

Средство оценки качества кластеризации предназначено для оценки степени достоверности кластерных решений, на основании которой пользователю будут выданы соответствующие рекомендации.

Средство визуализации предоставляет пользователю возможность взаимодействия с системой. На сегодняшний день реализованы следующие блоки: блок анализа, блок кластеризации (возможен выбор одной из двух мер сходства), частично блок визуализации.

Диаграмма классов системы представлена на

рисунке 2. Блок предварительного анализа реализован в виде класса *Analyzer*.

Каждый столбец исходных данных может принадлежать к одному из трех типов: номинальный (категорийный, *CATEGORICAL*); порядковый (*ORDINAL*); количественный (численный, *NUMERIC*).

Это реализовано с помощью перечисления типов. Распознавание типов данных осуществляется методом *recognizeTypes* класса *Analyzer*.

Интерфейс *Measure* позволяет реализовывать различные меры сходства, переопределяя методы расчета матрицы сходства *countMatrix(...)* и возврата полученной матрицы *getSimilarityMatrix()*.

Интерфейс *ClustAlgorithm* позволяет реализовывать алгоритмы кластеризации путем переопределения метода *getGroups*.

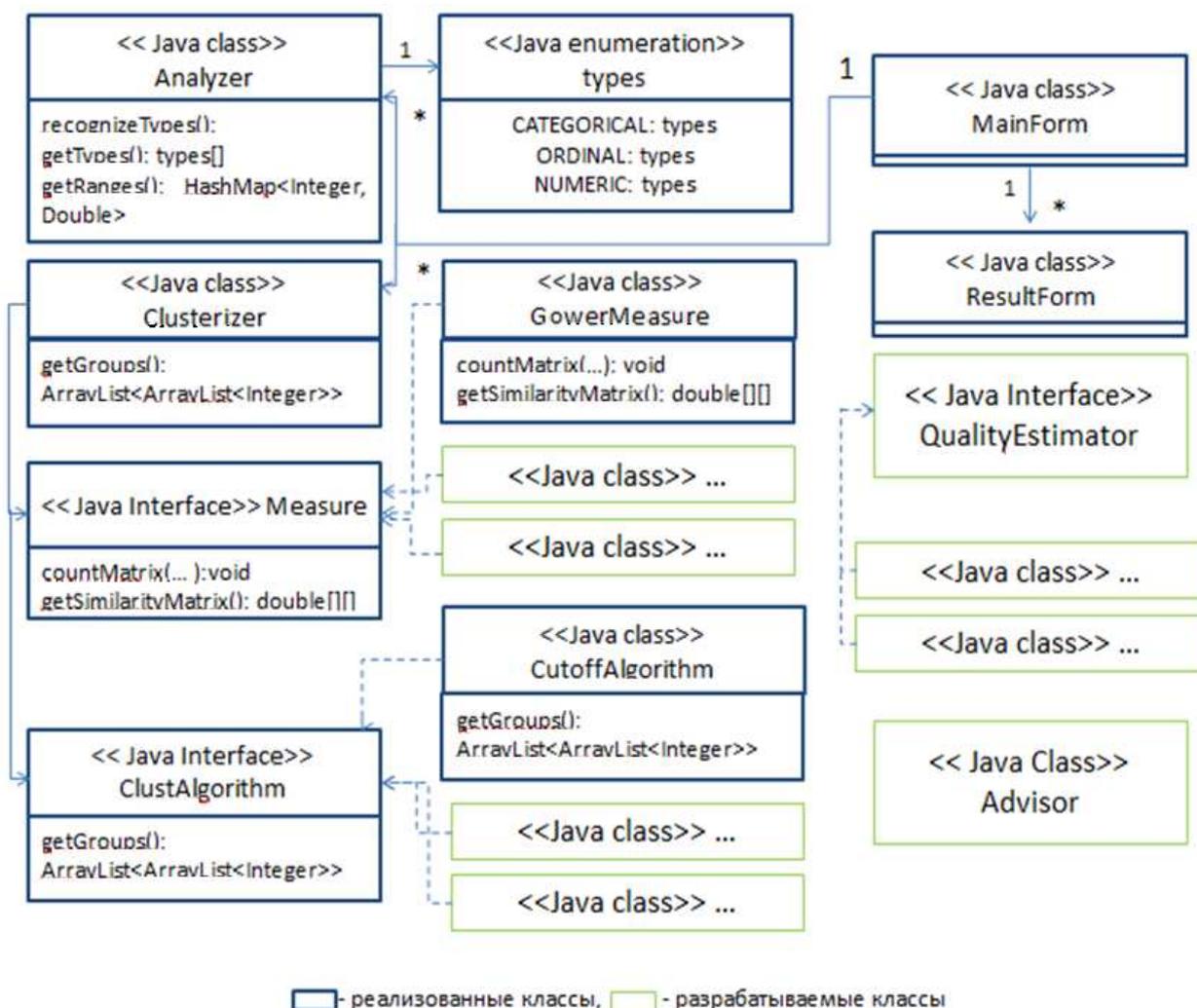


Рис. 2. Схема классов системы

Разработан простой алгоритм кластеризации, который относит объекты к одному кластеру, если расстояние между ними меньше заданного порогового значения. Данный алгоритм реализован в классе *CutoffAlgorithm*.

Планируется увеличение количества алгоритмов, использование, в том числе, итеративных и иерархических методов.

Класс *Clusterizer* представляет собой блок кластеризации и объединяет в себе расчет мер

сходства и выполнение алгоритма кластеризации.

Пользовательский интерфейс системы реализован в виде классов *MainForm* и *ResultForm* (последний необходим для вывода результатов в отдельном окне). В главной форме может быть создано несколько листов с данными, для каждого из которых создается экземпляр класса *Analyzer*, а также от одного до нескольких экземпляров класса *Clusterizer*.

Классы для оценки качества кластерного решения на сегодняшний день находятся в стадии разработки и обозначены на рисунке 2 как «разрабатываемые».

4. МЕРЫ СХОДСТВА И АЛГОРИТМЫ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

В программной системе на настоящий момент реализован модифицированный вариант двух мер сходства: мера Гауэра [1] и мера согласования разнотипных шкал [2]. Меры предназначены для вычисления сходства между объектами на основе разнотипных признаков. По сравнению с классическим вариантом, в меры введен учет веса показателя (признака). Вес показателя вводится пользователем системы, если у него есть соответствующая информация, при отсутствии таковой, все показатели учитываются с равным весом.

В модифицированном варианте меры Гауэра сходство между i -ым и j -ым объектом вычисляется по формуле:

$$s_{ij} = \sum_{k=1}^p s_{ijk} / \sum_{k=1}^p v_{ijk}, \quad (1)$$

где s_{ijk} – сходство объектов по k -му признаку; v_{ijk} – весовая переменная; p – число учитываемых признаков. Вес задается так, чтобы

$$\sum_{k=1}^p v_{ijk} = 1.$$

Вклад для качественных (номинальных и порядковых) признаков вычисляется следующим образом:

$$s_{ijk} = 1, \text{ если } X_{ik} = X_{jk}, \text{ иначе } s_{ijk} = 0. \quad (2)$$

Для количественных признаков:

$$s_{ijk} = 1 - \frac{|X_{ik} - X_{jk}|}{R_k}, \quad (3)$$

где R_k – размах значений переменной.

Модифицированная мера, согласующая разнотипные шкалы, по сути, является мерой расстояния и вычисляется следующим образом для i -ого и j -ого объектов.

Для количественных признаков расстояние вычисляется по формуле:

$$d_{num}(i, j) = \frac{|x_i - x_j|}{x_{max} - x_{min}} \quad (4)$$

Для номинальных признаков:

$$d_{nom}(i, j) = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m d(i, j)_s, \quad (5)$$

где m – число объектов в выборке, $d(i, j)_s$ – различия в отношениях i -го и j -го объектов к некоторому s -ому объекту.

Для порядковых признаков:

$$d_{ord}(i, j) = \frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m d(i, j)_s. \quad (6)$$

Суммарное расстояние между i -ым и j -ым объектом вычисляется по формуле:

$$d_{res}(i, j) = \sqrt{(v_1 d_{num}(i, j))^2 + (v_2 d_{nom}(i, j))^2 + (v_3 d_{ord}(i, j))^2} \quad (7)$$

где v_1, v_2, v_3 – веса показателей.

Формула (7) приведена для случая, когда каждый объект описывается одним количественным, одним порядковым и одним номинальным признаком и может быть расширена для случая p признаков разных типов.

Кластеризация выполняется при помощи порогового алгоритма [3].

Предварительно задается пороговое значение d_0 , объекты поступают на кластеризацию последовательно.

На первом шаге первый объект O_1 объявляется ядром E_1 первого кластера.

Пусть на m -м шаге выделено k кластеров с ядрами E_1, \dots, E_k . Для поступившего объекта O_m : если $d(O_m, E_1) \leq d_0$, то O_m относим к первому кластеру; если $d(O_m, E_{i-1}) > d_0$ и $d(O_m, E_i) \leq d_0$, $2 \leq i \leq k$, то O_m относим к i -му кластеру; если $d(O_m, E_i) > d_0$, $1 \leq i \leq k$, то O_m объявляется ядром E_{k+1} нового $(k+1)$ -го кластера.

Был также разработан оригинальный алгоритм кластеризации, который в настоящее время находится в стадии тестирования. Алгоритм итеративный, в качестве априорной информации для работы алгоритма необходимо указать число кластерных центров. В качестве центров выбираются объекты, находящиеся на максимальном расстоянии друг от друга.

Затем выполняется распределение объектов по кластерам. Расстояние до кластера вычисляется как среднее расстояние от включаемого объекта до каждого из объектов в кластере.

Пусть на первом шаге выбрано k объектов O_1, \dots, O_k , которые объявлены соответственно кластерными центрами: E_1, \dots, E_k .

На втором шаге выполняется отнесение объекта O_{k+1} к одному из кластеров: вычисляется расстояние между O_{k+1} и центрами кластеров E_1, \dots, E_k отдельно по каждому признаку на основе формул (4-6). Объект O_{k+1} относится к кластеру, расстояние до которого (7) минимально.

На m -ом шаге вычисляется среднее

расстояние для каждого i -го кластера между объектом O_{k+m} и объектами кластера отдельно по каждому признаку. Для количественных признаков:

$$\bar{d}_{num}(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{num}(o_{k+m}, j), \quad (8)$$

где n – число объектов в кластере.

Для номинальных признаков:

$$\bar{d}_{nom}(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{nom}(o_{k+m}, j). \quad (9)$$

Для порядковых признаков:

$$\bar{d}_{ord}(i) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{ord}(o_{k+m}, j). \quad (10)$$

Суммарное среднее расстояние между объектом O_{k+m} и i -ым кластером вычисляется по формуле:

$$\bar{d}_{res}(i, j) = \sqrt{(v_1 \bar{d}_{num}(i))^2 + (v_2 \bar{d}_{nom}(i))^2 + (v_3 \bar{d}_{ord}(i))^2}$$

Объект O_{k+m} относится к тому кластеру, у которого суммарное среднее расстояние (11) минимально.

Процесс продолжается, пока не будет выполнена кластеризация всех объектов.

4. АПРОБАЦИЯ СИСТЕМЫ

При помощи системы анализировались данные о хирургическом лечении больных с патологией восходящего отдела и дуги аорты (данные предоставлены ФГБУ «ННИИПК им. акад. Е.Н. Мешалкина» Минздрава России). База включает 20 признаков (показателей), оцененных у 124 пациентов, оперированных на восходящем отделе и дуге аорты с использованием различных хирургических технологий. В БД представлено 7 количественных, 2 порядковых и 11 номинальных признаков. Одним из тяжелых осложнений после операций на проксимальной аорте являются нарушения мозгового кровообращения (НМК) различной степени выраженности. Для практической медицины представляется важным выявить факторы риска возникновения НМК в раннем послеоперационном периоде и связать степень выраженности НМК со значениями выделенных факторов риска. Анализ взаимосвязи между отдельно взятыми факторами и НМК не позволил выявить статистически значимых связей. В ходе дальнейшего исследования была выдвинута гипотеза, согласно которой на НМК влияет одновременно комплекс (взаимосвязанная совокупность) факторов.

Для выявления комплекса факторов был

проведен кластерный анализ данных средствами программной системы.

На первом этапе проводилась кластеризация пациентов (мера Гауэра, пороговый алгоритм) с учетом всех имеющихся в БД признаков, а затем оценивалась значимость каждого из них на результат кластеризации. При оценке значимости использовались следующие критерии: для количественных признаков – одномерный дисперсионный анализ, для порядковых – непараметрический критерий Крускаллы-Уоллиса, для номинальных – критерий однородности χ^2 - Пирсона [4]. В результате были выделены 6 значимых признаков из 20 исходных, а именно: тип реконструкции дуги аорты (РД), вид перфузии головного мозга (ПГМ), время окклюзии аорты (ОА), циркуляторного ареста (ЦА) и искусственного кровообращения (ИК), НМК.

После этого производилась повторная кластеризация с учетом только значимых признаков. В результате было выделено и описано три кластера.

Средние значения количественных признаков по каждому из кластеров приведены на рисунке 3.

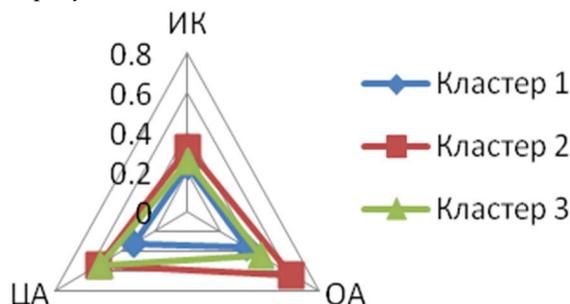


Рис.3. Диаграмма средних значений количественных признаков для кластеров 1, 2, 3

Показатели ОА, ЦА, ИК характеризуют длительность основного этапа хирургического вмешательства, когда функцию сердца и легких выполняет аппарат искусственного кровообращения (собственные сердце и легкие в данный промежуток времени не работают), что является обязательным условием выполнения хирургических вмешательств на аорте. Видно, что в первый кластер попали пациенты с наиболее низкими показателями ОА, ЦА, ИК, и наблюдается меньший процент пациентов с НМК (коды 1 и 2) в этой группе. Объекты с более высокой длительностью ОА, ЦА, ИК попали в третий кластер, и наконец, во втором кластере длительность ОА, ЦА, ИК самая продолжительная. Процент пациентов с НМК (коды 1 и 2) гораздо выше во втором (33 %) и третьем кластерах (45 %), по сравнению с первым кластером (22 %).

На рисунке 4 представлены диаграммы разделения на кластеры для номинальных признаков (РД, ПГМ). Диаграммы для

порядкового признака (НМК) приведены на рисунке 5.

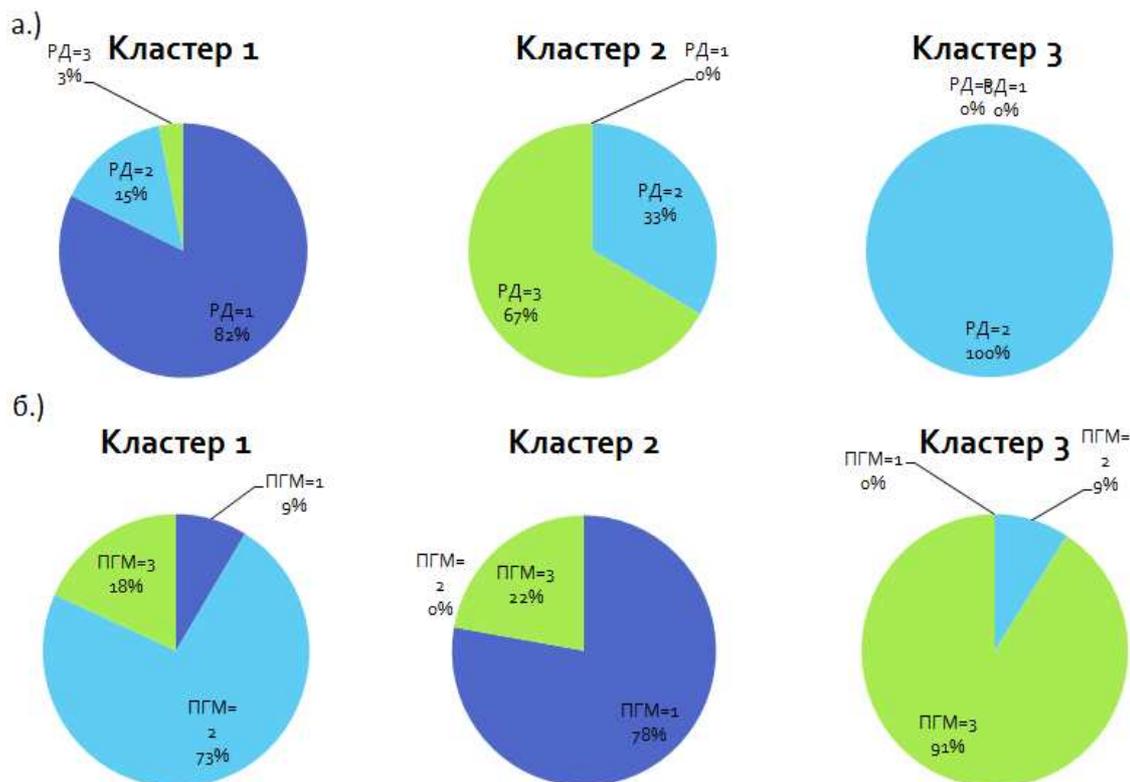


Рис. 4. Радиальная диаграмма значений номинальных признаков: тип РД (а) и ПГМ (б) для кластеров 1, 2, 3

Предполагается, что наименее рискованным с точки зрения развития НМК способом реконструкции дуги аорты является методика «агрессивного» косоанастомоза (код 1), а

также ретроградная перфузия головного мозга (код 2).

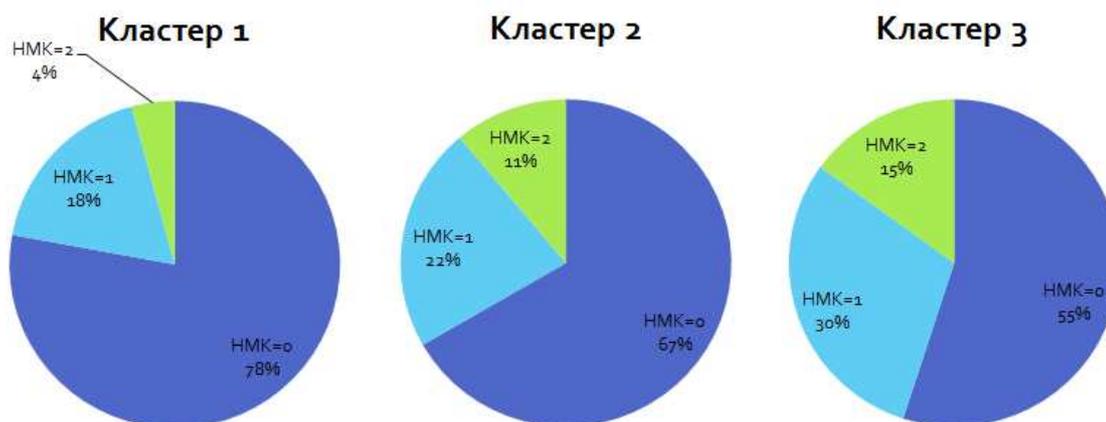


Рис. 5. Радиальная диаграмма значений порядкового признака НМК для кластеров 1, 2, 3

Именно эти типы преобладают в кластере 1, вместе с тем, процент нарушений мозгового кровообращения (коды 1 и 2) в указанной группе гораздо ниже, по сравнению с остальными (22%).

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Программная система кластерного анализа

данных смешанного типа (MixDC) применялась для анализа реальных медицинских данных. Результаты тестирования показали перспективность и эффективность применения разработанных в системе методов и алгоритмов для решения задач кластеризации. В дальнейшем предлагается развивать программную систему в следующих направлениях:

- расширение функционала системы путем разработки и реализации новых иерархических и итерационных алгоритмов кластеризации, а также реализация алгоритмов оценки качества кластерных решений;

- разработка средств визуализации процесса кластеризации и результатов анализа;

- «интеллектуализация» программной системы.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ким Дж.-О. Факторный, дискриминантный и кластерный анализ / Дж.-О.; пер. с англ. А.М. Хотинского и С.Б. Королева, науч. ред. И.С. Енюкова. - М.: Финансы и статистика, 1989. – 215 с.

[2] Загоруйко Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний/Н.Г. Загоруйко. – Новосибирск: Издательство института математики, 1999. – 270 с.

[3] Прикладная статистика и основы эконометрики / С.А. Айвазян, В.С. Мхитарян. – М.: ЮНИТИ, 2001. – 1006 с.

[4] Куликов Е.И. Прикладной статистический анализ/Е.И.Куликов. - М.: Горячая Линия - Телеком, 2008.- 464 с.

Альсова Ольга Константиновна – доцент кафедры ВТ НГТУ, к.т.н., E-mail: alsowa@mail.ru

Ускова Ксения Сергеевна – магистрант НГТУ, кафедра ВТ НГТУ, E-mail: xenia-uskova@mail.ru

Реализация дистанционного управления по радиоканалу Bluetooth платформой, моделирующей работу роботизированных средств

А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: Рассматриваются основные моменты построения программно-аппаратного модуля к платформе, описанной в статье «Построение платформы моделирующей работу роботизированных средств на базе конструктора *Lego Mindstorms NXT 2.0* в части управления электродвигателями» для дистанционного управления этой платформой через радиоканал *Bluetooth*.⁵

Ключевые слова: *Bluetooth*, модуль HC-05, передача данных, дистанционное управление, радиоканал, робототехника, микроконтроллер, программное обеспечение, *STM32*.

ВВЕДЕНИЕ

Каким бы «разумным» не была роботизированная система, всегда существует непредвиденные обстоятельства, которые могут возникнуть в любой момент и ввести устройство в неработоспособное состояние. По этой причине человеческое вмешательство в ход управления роботом становится практически единственным выходом в спасении ситуации. Вот тогда на помощь приходит дистанционное управление, которое позволяет корректировать выполняемые роботом действия, выбирать стратегию поведения или полностью взять управление роботом на себя.

Из всех возможных способов дистанционного управления (механического, проводного, ультразвукового, инфракрасного и радио-передающего) для управления подвижными мобильными роботами больше всего подходит именно радиоканал, по причине способности работать на довольно больших расстояниях и отсутствию необходимости прямой видимости объекта управления.

В настоящее время производители электроники предлагают множество способов передачи данных с использованием радиоэфира. В основном это микросхемы работающие на

радиочастоте или готовые электронные модули. Программно эти элементы поддерживают, в основном, специализированные или стандартные протоколы передачи данных. Одним из стандартных протоколов передачи данных по радиоканалу, получившим широкое распространение, является *Bluetooth*. Он позволяет обмениваться данными на расстоянии до 100 метров (I класс устройств), имеет поддержку в современных операционных системах персональных компьютеров и весьма распространён. *Bluetooth* также обладает довольно полезным профилем *Serial Port Profile (SPP)*, который позволяет эмулировать работу последовательного порта.

На рынке существует множество электронных модулей поддерживающих *Bluetooth*, которые варьируются как по цене, так и по набору предоставляемых функций. Особый интерес для решения задачи дистанционного управления платформой для изучения роботизированных систем представляют модули *Bluetooth* серии HC от китайских производителей. Одним из представителей этой серии является модуль HC-05 [2], внешний вид которого представлен на рисунке 1.

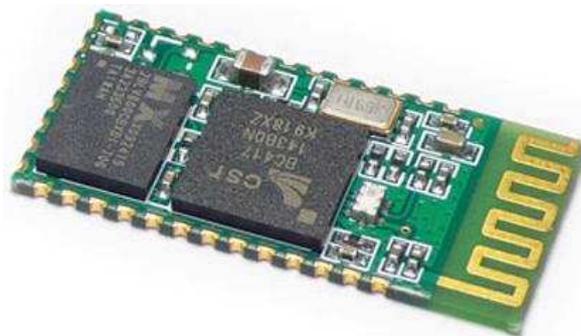


Рисунок 1. Внешний вид модуля HC-05

HC-05 представляет собой электронный модуль построенный на базе микросхемы BC417 от компании *Cambridge Silicon Radio* [3]. Данный модуль позволяет достаточно просто реализовать передачу данных между персональным компьютером и соединённым с HC-05 микропроцессорным устройством (в данном случае микроконтроллером *STM32*).

Наряду с обычным обменом данными,

⁵ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

модуль позволяет производить свою настройку по последовательному каналу при помощи простых текстовых команд, а также существует возможность смены управляющей программы HC-05 через встроенный в модуль интерфейс SPI. Кроме того, модуль имеет выводы для подключения индикаторов текущего состояния

устройства и имеет 12 настраиваемых портов ввода / вывода. Кроме этого, немаловажной особенностью является наличие миниатюрной печатной антенны прямо на плате модуля. Все эти возможности делают процесс обучения и работы с модулем более насыщенным простым и разнообразным.

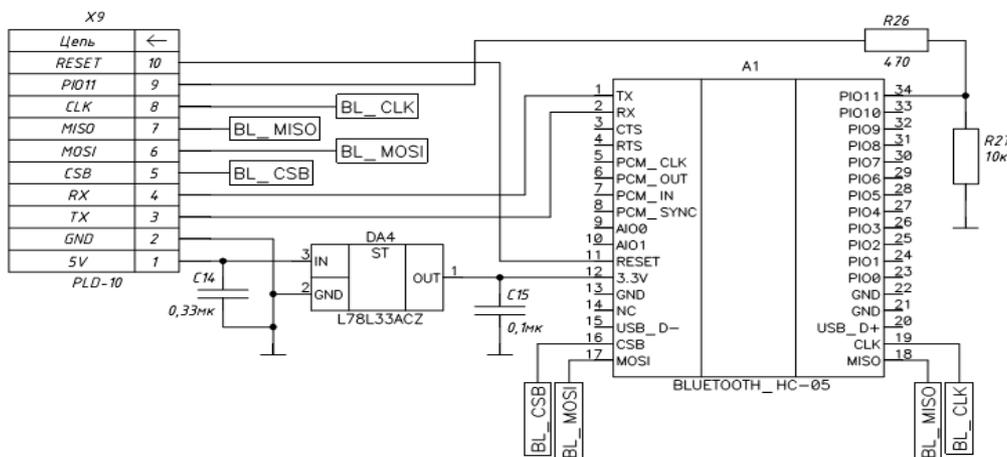


Рисунок 2. Схема программно-аппаратного модуля дистанционного управления

В интернете существуют достаточное количество отзывов об использовании этого модуля и изложение личного опыта построения устройств на его основе [4, 5].

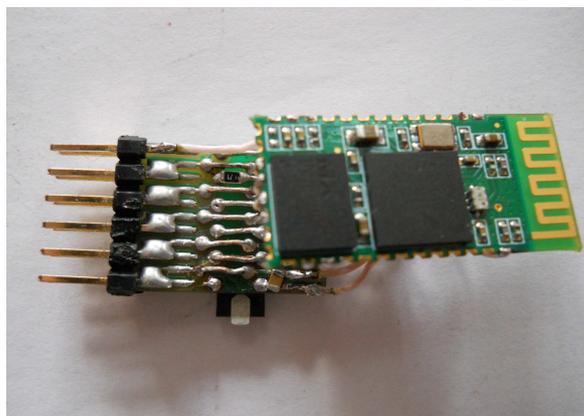


Рисунок 3. Внешний вид аппаратной части собранного модуля

Данная статья является продолжением статьи [1] по построению учебно – демонстрационной роботизированной платформы и преследует основной целью изложение опыта построения создаваемого на базе HC-05 программно-аппаратного модуля для данной платформы.

Аппаратная часть программно-аппаратного модуля представляет собой монтажную плату с выведенными на штыревую линейку выводами TX, RX, GND, +3,3V, RESET и PIO11 модуля HC-05, для подключения к соответствующим выводам микроконтроллера STM32 платформы. Схема этой платы изображена на рисунке 2, а результат сборки по этой схеме на рисунке 3.

Как видно на рисунке 3, для подключения к

платформе используется тот же принцип, который описан в [1] - штыревые линейки. Это общий подход при построении модулей для данного устройства.

Имеющийся на плате STM32VLDISCOVERY вывод напряжения питания, помеченный как «3V3» на деле имеет напряжение в диапазоне 2,7 ... 3,0 В, чего не достаточно для стабильного питания модуля, которое должно быть в диапазоне 3,0 ... 4,2 В, согласно [6]. Поэтому в схему введён стабилизатор напряжения на 3,3 В питающийся от другого выхода напряжения источника питания, помеченного как «5V» (на самом деле 4,6 ... 4,7 В). Такое отличие в величинах напряжений обусловлено наличием диодов Шоттки в схеме STM32VLDISCOVERY и поэтому при работе с этой платой требуется учитывать это.

Вывод модуля PIO11 служит для управления режимами работы модуля таков: если на выводе присутствует логический ноль, то модуль HC-05 переходит в режим обмена данными по радиоканалу Bluetooth, а если на выводе присутствует логическая единица, то в режим передачи команд AT, для настройки модуля.

AT-команды передаются в текстовой форме. Перечень команд AT достаточно обширный, и их назначение изложено в [7]. Для того чтобы начать обмен данными по Bluetooth можно не производить настройку AT-командами. Если сначала модуль сбросить подачей на вывод модуля RESET логического нуля, а на вывод PIO11, в это время, подать логическую единицу, то после запуска работы модуля (подача на вывод RESET логической единицы) скорость обмена данными в режиме команд AT будет установлена на уровне 38400 бод / с, а длина

посылки будет составлять 8 бит без контроля чётности с 1 стоп-битом. В случае если логическая единица на выводе *PIO11* появится после сброса, то скорость передачи изменится на 9600 бод / с с теми же параметрами передачи данных, что и при скорости 38400 бод / с. Таким образом, в режиме передачи команд *AT* существуют только два варианта скорости передачи данных.

По причине низкого напряжения на выходе *TX* модуля *HC-05* необходимо наличие на этой линии подтягивающего к логической единице резистора, в противном случае передача команд и данных будет не устойчивой. К счастью, этого легко добиться, изменив настройки порта в микроконтроллере.

Из-за низкого качества документации в ней допущена ошибка, которая выявилась при работе с модулем: скорость передачи, по умолчанию, в режиме передачи данных по радиоканалу составляет 9600 бод / с, а не 38400 бод / с как заявлено в документации [6]. Но эту

величину всегда можно изменить в режиме *AT*-команд.

Для соединения с *Bluetooth* устройствами персональный компьютер должен быть оборудован *Bluetooth* радио-модулем (встроенным либо внешним). Внешние модули обычно называются *Bluetooth Dongle*. Как правило, любой вариант подходит для решения этих задач. Перед тем как соединиться с *HC-05*, радио-модуль должен быть установлен в системе как обычное устройство.

Со стороны персонального компьютера обмен данными с *HC-05* происходит через виртуальный последовательный *COM*-порт. Для того чтобы начать обмен данными с модулем *Bluetooth* необходимо, чтобы в системе появился такой порт. Для этого в Панели управления операционной системы *Windows* нужно выполнить пункт «Устройства *Bluetooth*» (для примера, на рисунке 4 выделен этот значок) и добавить устройство *Bluetooth* с набором таких портов.

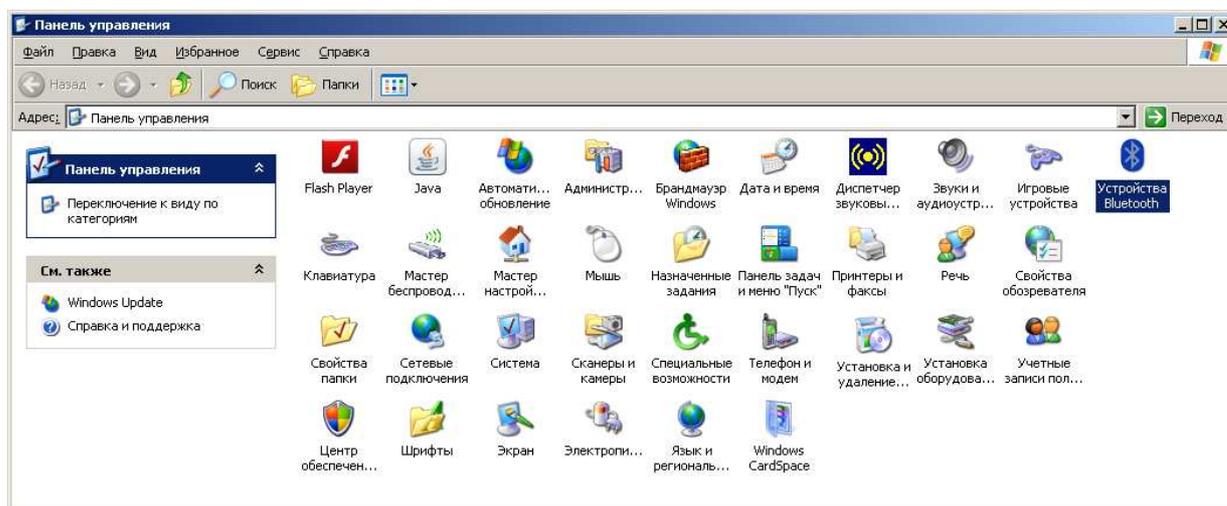


Рисунок 4. Значок "Устройства Bluetooth"

Далее необходимо подать питание на модуль *HC-05* и нажать на кнопку «Добавить...» в появившемся диалоге. В следующем окне мастера следует установить галочку «Устройство установлено и готово к обнаружению» как показано на рисунке 5 и нажать клавишу «Далее >>».

На следующем шаге система проведёт сканирование устройств *Bluetooth* и предложит на выбор имеющиеся поблизости устройства. Здесь

следует выбрать *HC-05* и нажать «Далее >>». Затем появится следующее окно мастера, в котором будет предложено на выбор 4 варианта подключения. Нам будет интересно «Использовать ключ доступа из документации». Выбираем его и в ставшем активном поле ввода вводим ключ 1234 из документации [6] как показано на рисунке 6 и жмём клавишу «Далее >>».

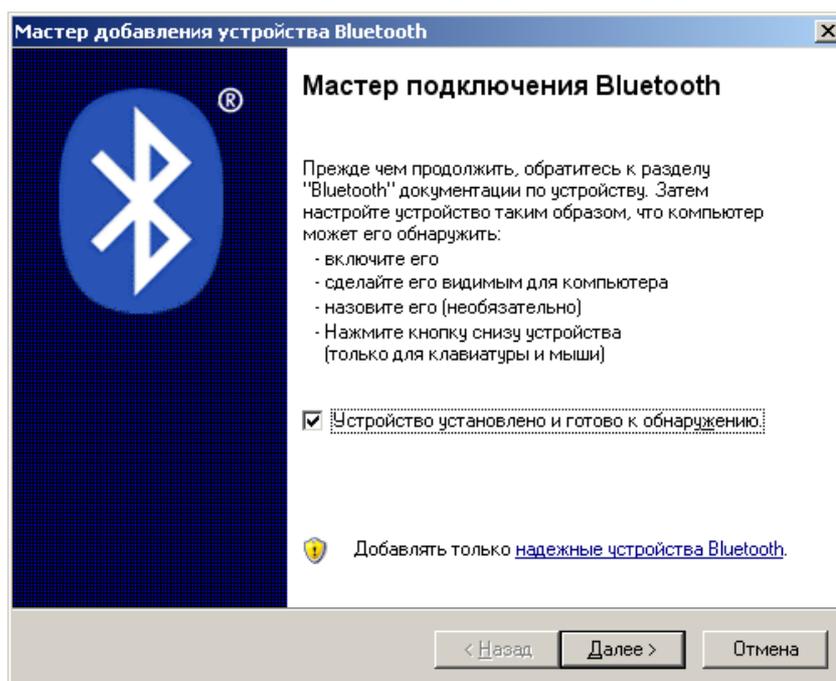


Рисунок 5. Шаг 1. Добавление устройства Bluetooth

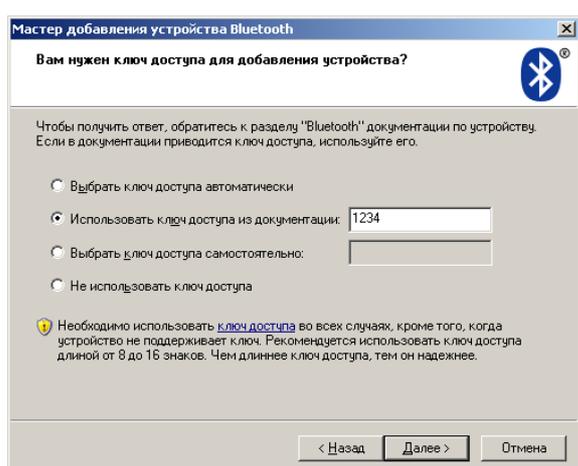


Рисунок 6. Выбор способа ввода ключа Bluetooth устройства

Дальше система сама осуществит подключение к модулю *HC-05*, выполнив все необходимые пункты, и создаст в системе набор виртуальных *COM*-портов как показано на *рисунке 7* здесь нужно обратить внимание на номер исходящего *COM*-порта (на рисунке это *COM3*), именно через него будет происходить обмен данными.

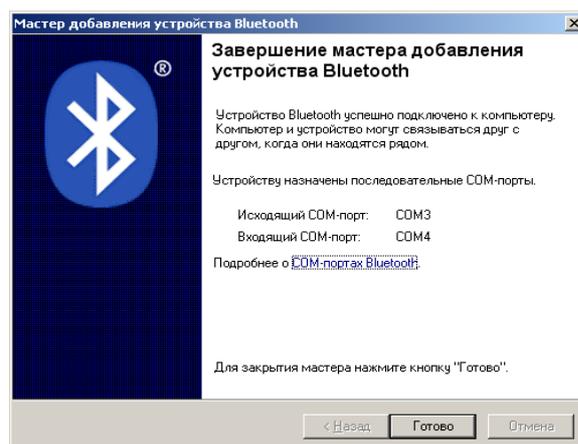


Рисунок 7. Результат добавления устройства Bluetooth

Не все программы-терминалы поддерживают эмуляцию *COM*-порта *Bluetooth* (в том числе и *HyperTerminal*, входящий в поставку *OC Windows XP*). В интернете можно найти множество бесплатных программ - терминалов, в том числе с поддержкой *COM*-порта *Bluetooth*. К таким, например, можно отнести бесплатную программу терминал *Termite* [8]. Внешний вид данной программ показан на *рисунке 8*.

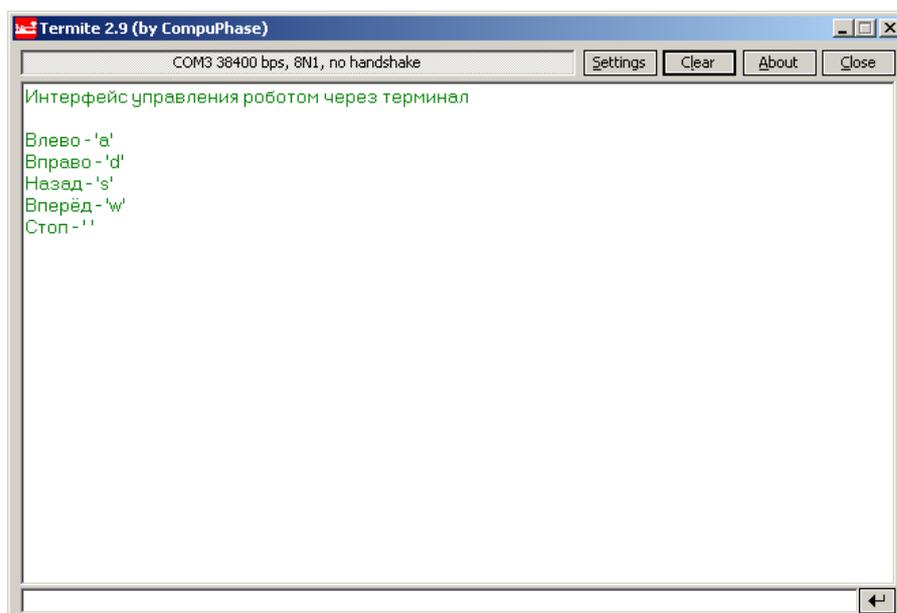


Рисунок 8. Внешний вид программы-терминал Termite

К недостаткам данной программы можно отнести отсутствие интерактивного режима передачи команд (необходимо каждый раз при передаче строки или символа необходимо нажимать клавишу «Enter», что не всегда удобно).

Для проверки работоспособности собранного модуля была написана программная часть программно-аппаратного модуля (драйвер), реализующая обмен данными с модулем, и написана простая тестовая программа, для микроконтроллера платформы, использующая этот драйвер.

Работа тестовой программы заключается в получении символа по радиоканалу; в зависимости от него, формируется управляющий сигнал на сервомоторы платформы, для её движения вперёд, назад, влево, вправо или остановки на месте. Также предусмотрен вывод справочной информации (при отправке символа «h») по основным управляющим командам в окно программы — терминала. Так при отправке символа «a» платформа должна начать поворачиваться влево, при отправке символа «d» - вправо, при отправке «w» должно начаться движение вперёд, а для того, чтобы начать движение назад необходимо отправить символ «s». Если необходимо остановить движение платформы следует ввести пробел.

Программный код драйвера реализован в виде связи заголовочного файла с файлом реализации, и применён объектно-ориентированный подход. Драйвер настраивает и работает с USART1 периферией микроконтроллера. Работа с ней построена на прерываниях. Драйвером используется два прерывания USART1: прерывание по приёму символа и по опустошению буфера передатчика. Драйвер в своём составе имеет два метода: `void Init()` и `void SendHelpString()`. Первый настраивает USART1 на обмен данными со

скоростью 9600 бод / с: 8 бит данных и 1 стоп-бит без контроля чётности, а второй инициирует отправку строки-подсказки по управляющим символам.

Оба прерывания (по приёму и опустошению буфера) вызывают один и тот же обработчик, поэтому в его теле происходит проверка появления того или иного прерывания и происходит либо отправка следующего символа или запись принятого байта. Драйвером предусмотрено два режима работы: обмен AT-командами и обмен данными (в зависимости от состояния вывода PIO11). Внутри обработчика происходит проверка текущего режима работы и в зависимости от этого изменяется поведение по отправке или приёму.

В ближайшее время планируется расширить функционал платформы путём добавления ещё одного программно-аппаратного модуля – ультразвукового измерителя расстояния HC-SR04.

ВЫВОДЫ

1. Реализация тестовой программы для управления модулем HC-05 показала работоспособность созданного программного драйвера.

2. Команды в текстовой форме позволяют управлять платформой из различных программ-терминалов.

3. Структура созданной роботизированной платформы не разрушается при добавлении программно-аппаратного модуля, что подтверждает правильность начального этапа построения.

ЛИТЕРАТУРА

[1] В.А. Жмудь, Е. Halbah., А.Л. Печников, В.Г. Трубин. К вопросу об алгоритме управления снегоуборочными машинами. Автоматика и программная инженерия. 2012. № 2 (2). С. 65–71. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия), Университет Аалто (Хельсинки, Финляндия). URL: <http://www.nips.ru/images/stories/zhournal-AIPI/2/Paper-2012-2-9.pdf>

[2] 1pcs Wireless Bluetooth Transceiver Module RS232 / TTL HC-05 – Ebay URL: <http://www.ebay.com/itm/1pcs-Wireless-Bluetooth-Transceiver-Module-RS232-TTL-HC-05-/251066012059> (дата обращения 2.04.2013).

[3] BlueCore™4-External Product Data Sheet URL: http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fentropia.kapsi.fi%2Fblog%2Fwp-content%2Fuploads%2F2011%2F10%2FCSR_BC417.pdf&ei=s0hUUYWEAaKN4ATkioG4DA&usg=AFQjCNF-liaT9vPUdMB17bimBY2_yyY6SQ&bvm=bv.44442042.d.bGE&cad=rjt (дата обращения: 2.04.2013).

[4] Bluetooth - модуль HC-05 URL: <http://robocraft.ru/blog/electronics/587.html> (дата обращения 2.04.2013).

[5] Работа с Bluetooth модулем HC05 URL: <http://we.easyelectronics.ru/part/rabota-s-bluetooth-modulem-hc05.html> (дата обращения: 2.04.2013).

[6] HC Serial Bluetooth Products User Instructional Manual URL: http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.mcu-turkey.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2013%2F01%2FHC-Serial-Bluetooth-Products-201104.pdf&ei=CE5aUcreFuX24QST-IHQc&usg=AFQjCNHYyZdraOvE7pbYm0N0_DuJfRahBg&bvm=bv.44442042.d.bGE&cad=rjt (дата обращения 2.04.2013).

[7] HC-03/05 Embedded Bluetooth Serial Communication Module AT command set URL: http://www.google.ru/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.instructables.com%2Ffiles%2Fforig%2FF3O%2FK70G%2FH1LWQ0P0%2FF3OK70GH1LWQ0PO.pdf&ei=MJJaUYTHFOqq4AS5g4HQCA&usg=AFQjCNGC1T5GuA-xIbI_1tc6Zm3AR3GnBw&bvm=bv.44442042.d.bGE&cad=rjt (дата обращения 2.04.2013).

[8] Termite: a simple RS232 terminal URL: http://www.compuphase.com/software_termite.htm (дата обращения 2.04.2013).

[8] Termite: a simple RS232 terminal URL: http://www.compuphase.com/software_termite.htm (дата обращения 2.04.2013).

Алексей Викторович Ескин - ведущий инженер ООО «КБ Автоматика», e-mail: kba-elma@bk.ru



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 200 научных статей, включая 10 патентов и 6 учебных пособий. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника. E-mail: oao_nips@bk.ru



Виталий Геннадьевич Трубин, зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика». <http://www.sibindustry.ru/firm.asp?t=0&prm=9607&moid=0&tabindex=0> Автор 18 научных статей. Область интересов – разработка специализированной электроники. E-mail: trubin@ngs.ru

Построение платформы моделирующей работу роботизированных средств на базе конструктора Lego Mindstorms NXT 2.0 в части управления электродвигателями

А.В. Ескин, В.А. Жмудь, В.Г. Трубин
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация: Рассматривается платформа для моделирования и изучения робототехнических средств на базе сервомоторов и деталей из конструктора *Lego Mindstorms NXT 2.0* и отладочной платы *STM32VLDISCOVERY*.⁶

Ключевые слова: робототехника, микроконтроллер, программное обеспечение, конструктор *Lego Mindstorms NXT 2.0*, отладочная плата *STM32VLDISCOVERY*.

ВВЕДЕНИЕ

Проникновение в промышленность роботизированных систем постоянно увеличивается с каждым годом. Особенно остро стоит потребность в тех областях жизнедеятельности, где есть прямая угроза здоровью человека — например, угроза радиоактивного излучения. Так же существует потребность в специалистах, способных разрабатывать эффективные алгоритмы управления для данных систем, и инструментах, которые позволили бы разработанные алгоритмы проверять на практике. Одним из примеров такого инструментария может быть конструктор *Lego Mindstorms NXT 2.0*, который включает в себя все необходимые элементы робота: механическую часть, электронную и программную [1].

Наряду с очевидными достоинствами конструктора у него имеются и недостатки, к которым можно отнести:

1. Ограниченный и навязанный набор датчиков;
2. Ограниченное количество портов для управления сервомоторами и портов для подключения датчиков, которых не всегда хватает для решения задачи;
3. Навязанная схемотехника микрокомпьютера *NXT*, мешающее более гибкой настройке устройства.
4. Скрытие от пользователя принципов работы датчиков (сигнал с датчиков передается в

цифровом виде по каналу *I2C*, в отличие от прямого анализа аналогового сигнала).

Для устранения этих недостатков, а также повышения прозрачности и гибкости в изучении и построении роботов было решено собрать роботизированную платформу, используя только некоторые элементы данного конструктора. Внешний вид этой платформы представлен на рис. 1.

Данная статья основана на [1] и продолжает обсуждение темы применения элементов набора *Lego Mindstorm NXT 2.0* в образовательных целях.

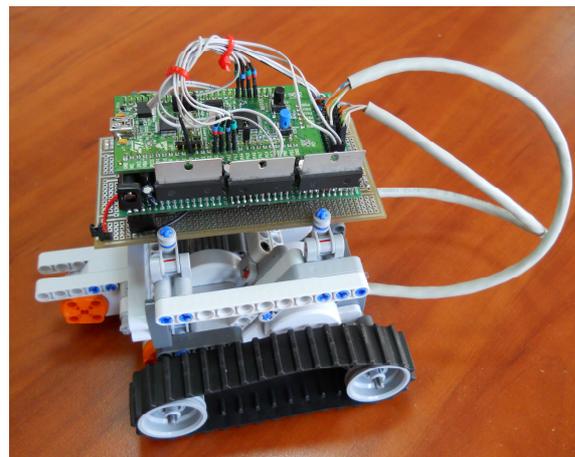


Рис. 9. Внешний вид платформы

При построении платформы основной целью было создание минимального базового набора программно – аппаратных средств с возможностью будущего расширения функциональности путём добавления программно-аппаратных модулей. Такой подход позволяет строить роботы необходимые для решения конкретной задачи путём добавления уже созданных программно-аппаратных модулей или, в отличие от базового набора *Lego*, создавать свои собственные модули отдельно друг от друга.

К сожалению, нужно обладать знаниями не только в программировании, но и в области схемотехники, а также уметь паять. Но развитие и закрепление знаний в этих областях на практике, очень полезно для обучаемого.

⁶ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

Суммируя выше сказанное, можно сказать, что в сравнении с набором *Lego* данная платформа обладает следующими преимуществами:

1. Гибкое модульное настраивание системы под конкретную задачу;
2. Практически не ограниченный выбор датчиков (зависит от наличия и количества у микроконтроллера соответствующих периферийных модулей);
3. Прозрачность в изучении работы датчиков и исполнительных устройств.

АППАРАТНАЯ ЧАСТЬ

Для апробирования идеи было решено начать с реализации модуля управления сервомоторами

из набора *Lego*. Они представляют собой обычные электродвигатели постоянного тока со встроенным квадратурным энкодером, питающимся от напряжения 5 В.

Сервомотор (см. на *рис. 2*), содержит:

1. Электродвигатель постоянного тока, с защитным устройством от перегрузки по току;
2. Плату, на которой установлены светодиоды и фотоприёмники энкодера с защитными цепями;
3. Шестиступенчатый редуктор, с суммарным передаточным числом 1:48, от выходной втулки к валу электродвигателя;
4. Зубчатое колесо энкодера с передаточным отношением 10:32 от двигателя к колесу энкодера.

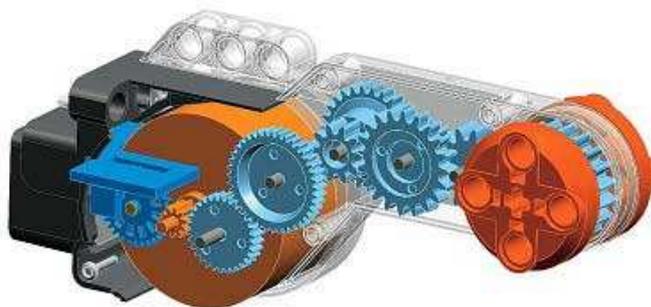


Рис. 10. Внутреннее устройство электродвигателя из набора *Lego Mindstorm NXT 2.0* [2].

При вращении, квадратурный энкодер выдаёт 180 импульсов на один оборот выходной втулки, что достигается количеством щелей в колесе энкодера равным 12 [2]. При использовании обеих фронтов сигнала (нарастающего и спадающего) можно получить разрешение 360 импульсов (градусов) на оборот.

Сервомотор *Lego* имеет специализированный разъём для подключения к внешним цепям, по форме он похож на стандартный телефонный разъём *RJ-12*, с той лишь разницей, что язычок защёлки у разъёма *Lego* (на *рис. 3* справа) смещён к правой стороне разъёма, а у *RJ-12* (на *рис. 3* слева) он находится в центре. Существует описание [3] доработки разъёма *RJ-12* до разъёма *Lego*. После нескольких попыток переделки разъёма не кажется такой сложной задачей.

При автономной работе питание электродвигателей и платы платформы может быть осуществлено от напряжения 9 В (6 щелочных батарей) или 7,2 В (6 аккумуляторов *NiMH*). При стационарной отладке программы, может питаться внешним источником напряжения 12 В.

Для управления электродвигателями постоянного тока на рынке существует множество специализированных микросхем. Одной из таких легко доступных и дешёвых микросхем является *BA6219B* японской фирмы *ROHM* [4].

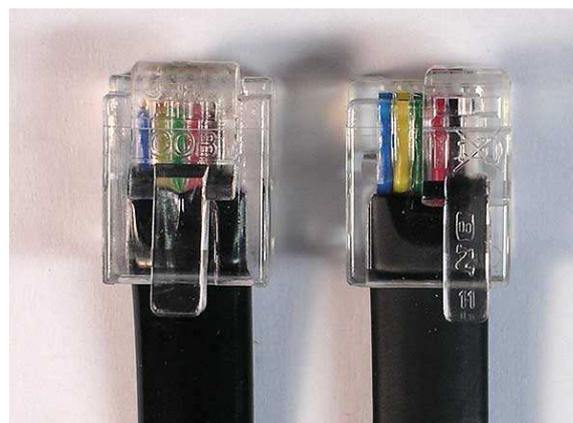


Рис. 11. *NXT* Разъём в сравнении со стандартным *RJ-12*

При помощи данной микросхемы можно управлять двигателями постоянного тока в четырёх возможных режимах: вращение вперёд, вращение назад, остановка вращения с выбегом ротора и торможение. Остановка вращения с выбегом ротора происходит в условиях работы двигателя близких к холостому ходу, а в режиме торможения - близких к короткому замыканию. Торможение двигателя позволяет достичь более быстрой остановки вращения. К недостаткам данной микросхемы можно отнести относительно высокий минимальный порог напряжения на управляющих входах в режиме логической единицы – 3,0 В, что не совместимо с *TTL* логикой (при питании 3,3 В), применяемой в микроконтроллере *STM32* (уровень единицы

равен 2,0 В). Для решения этой проблемы был введён транзисторный каскад с общим эмиттером, который согласует уровни, но вносит инверсию в управляющий сигнал (что нужно учитывать при написании программы управления).

Для ограничения напряжения подаваемого на мотор *NXT*, при питании от внешнего преобразователя напряжения 12 В, и соответственно, частоты вращения двигателя, введён стабилитрон на напряжение 9,1 В между специально для этого предназначенными выводами 1 и 4 микросхемы.

К сожалению, микросхема *BA6219B* не имеет встроенного механизма управления частотой вращения (кроме ограничения). Поэтому было решено применить ШИМ-управление.

Максимальной частоте вращения ротора двигателя соответствует ШИМ-заполнение равное 100%, а нулевой частоте – ШИМ-заполнение равное 0%.

Направление вращения, текущий угол поворота ротора двигателя и частота вращения определяется по синусным и косинусным сигналам, поступающим от квадратурного энкодера. Направление вращения определяется по опережению или запаздыванию одного сигнала энкодера относительно другого. Угол поворота высчитывается путём подсчёта импульсов с одного из каналов энкодера. Частота вращения определяется количеством импульсов в единицу времени. Пример сигнала от квадратурного энкодера приведён на рисунке 4.

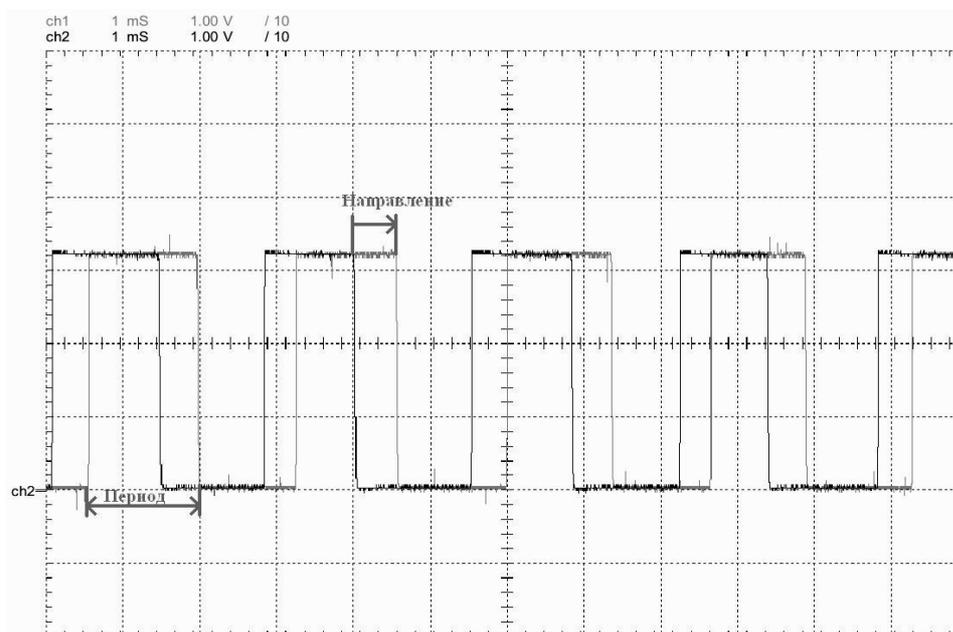


Рис. 12 - Осциллограммы сигналов с квадратурного энкодера.

Для согласования уровней сигналов квадратурного энкодера (напряжения импульсов составляют 5 В) и 3,3 Вольтовой TTL-логики, а также защиты от попадания напряжения больше чем напряжение источника питания, и переполосовки применена схема из описания на блок микрокомпьютера *NXT* [5].

В качестве управляющего элемента платформы выбрана отладочная плата *STM32VLDISCOVERY*, которая содержит микроконтроллер *STM32F100RBT6B*, *ST-Link* (встроенной интерфейс отладки), светодиоды и пользовательскую кнопку [6]. Данная плата может быть как источником напряжений 5 В или

3,3 В, так и питаться от внешних источников напряжения с таким же напряжением. В режиме источника напряжения, плата получает питание через *USB* разъём. Также плата оснащена штыревыми линейками, имеющими контакт со всеми выводами микроконтроллера, что очень удобно при построении модульных систем. Внешний вид *STM32VLDISCOVERY* приведён на рис. 5.

Соединение составных частей платформы (монтажных плат) выполнено при помощи штыревых соединителей *PLS* и *PBS*. Местонахождение разъёмов на монтажных платах и сами монтажные платы изображены на рис. 6.

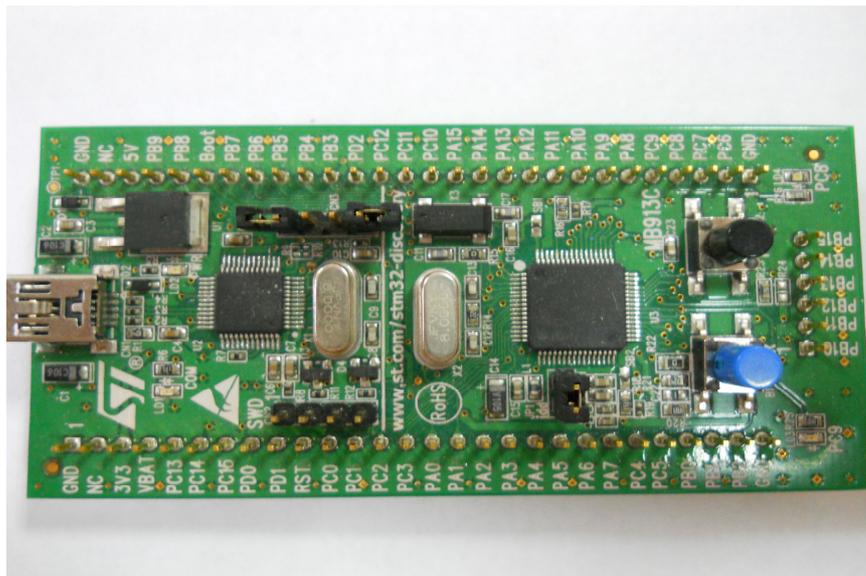


Рис. 13. Внешний вид отладочной платы *STM32VLDISCOVERY*

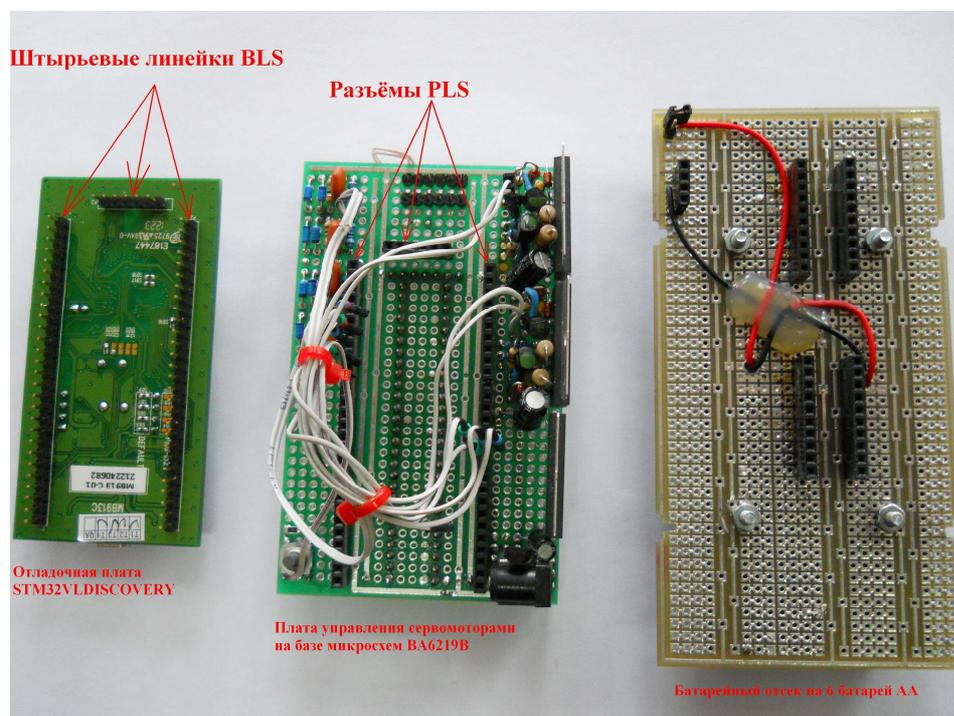


Рис. 14 - Соединение плат при помощи разъёмов *PLS* и *PBS*.

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

Для программирования и отладки микроконтроллеров семейства *STM32* существует множество сред разработки программного обеспечения. Среди них львиную долю занимают платные среды. Существуют также бесплатные, но они, зачастую, имеют ограничения по исполняемому коду. В настоящее время, как среди разработчиков микроконтроллеров (*Texas Instruments*, *NXP* и др.), так и среди рядовых любителей электроники набирает популярность свободная интегрированная среда разработки модульных кроссплатформенных приложений

Eclipse, которая развивается и поддерживается *Eclipse Foundation* [7]. Основным достоинством данной среды является её настройка под конкретную разработку ПО путём добавления соответствующих плагинов. К недостаткам можно отнести медленную работу, вызванную тем, что среда написана на языке программирования *Java*. Так как микроконтроллеры семейства *STM32* построены на распространённой архитектуре ядра *Cortex M3*, то недостатка в плагинах для *Eclipse* нет, поэтому выбор пал именно на эту среду разработки. Внешний вид окна программы приведён на рис. 7.

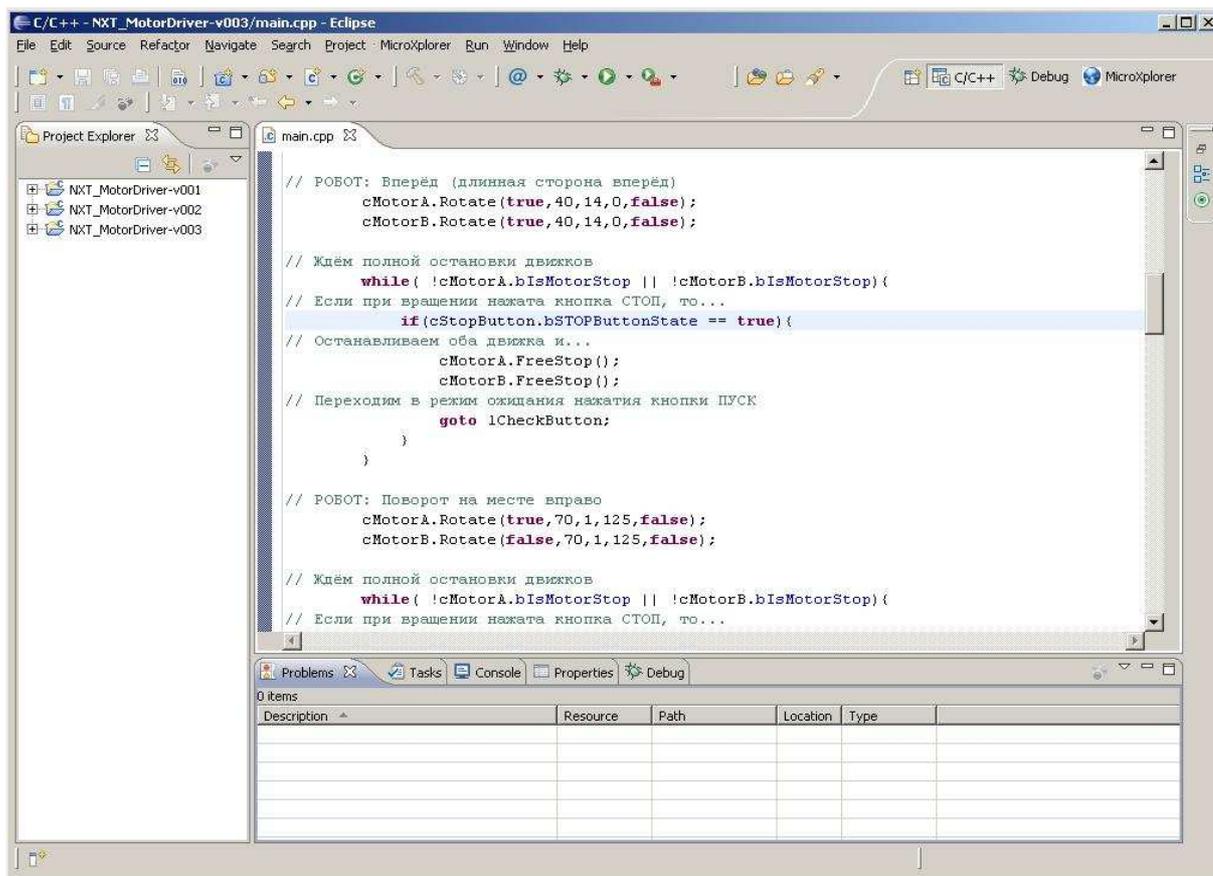


Рис. 15. Внешний вид среды разработки Eclipse Helios SR2

В качестве пакета компиляции выбран бесплатный - *Sourcery CodeBench Lite Edition* из *GNU Compiler Collection*. *Sourcery CodeBench Lite Edition* от фирмы *Mentor Graphics*. Он содержит в себе, помимо компилятора, также другие утилиты, необходимые для сборки и подготовки файла прошивки микроконтроллера [8]. Для отладки кода использовался *GNU Debugger* из пакета *Sourcery CodeBench Lite Edition* в связке с *GDB* сервером сторонних производителей. Программирование осуществлялось через установленный на плате интерфейс инструментария отладки *ST-Link*.

Так как основной задачей платформы, на данном этапе построения, является управление сервомоторами *NXT*, то требовалось написать программный драйвер, управляющий их работой, с учётом модульного построения системы. Отладка и демонстрация работоспособности этого драйвера велась на примере тестовой программы. Модульность драйвера заключается в реализации кода в связке заголовочного файла с файлом реализации, и применении объектно-ориентированного подхода. К сожалению, не удалось создать универсальный тип данных объекта сервомотора (с последующим набором экземпляров для отдельных сервомоторов) из-за трудностей с распределением периферии микроконтроллера. Поэтому в программе для

каждого сервомотора *NXT* выделен свой набор периферии, и свой тип данных (класс в C++), который представляет собой драйвер.

Драйвером сервомотора *NXT* предусмотрен следующий набор команд:

1. движение вперёд с установкой конечного угла поворота;
2. движение вперёд без установки конечного угла поворота;
3. движение назад с установкой конечного угла поворота;
4. движение назад без установки конечного угла поворота;
5. стоп с выбегом;
6. торможение.

Данный набор команд отображает всю заявленную функциональность микросхемы *BA6219B*.

Одна команда представляет собой вызов метода класса, который объявлен как:

```
«void Rotate (bool bForwardRotation, unsigned char uchSettablePower, unsigned int uiSettableRotationNumber, unsigned int uiSettableAngel, bool bBrakeMotor)»,
```

где «bool bForwardRotation» - задает направление вращения,

«unsigned char uchSettablePower» - устанавливаемая мощность вращения (заполнение ШИМ сигнала),

«*unsigned int uiSettableRotationNumber*» - требуемое количество оборотов вала сервомотора,

«*unsigned int uiSettableAngel*» - требуемый угол поворота внутри одного полного оборота вала сервомотора и

«*bool bBrakeMotor*» - необходимо ли торможение в конце поворота на требуемый угол.

Если необходимо вращать сервомотором постоянно, то параметры «*unsigned int uiSettableRotationNumber*» и «*unsigned int uiSettableAngel*» следует установить в нуль. Например, для того, чтобы повернуть робот, имеющий два гусеничных привода (правый и левый) на месте на угол 90°, необходимо подать по одной команде каждого драйвера с разной величиной параметра «*bool bForwardRotation*». В этом случае, один из двигателей, будет поворачивать влево на заданный угол, в то время как другой будет поворачивать вправо на этот же

угол, что приведёт в итоге к повороту на месте всего робота на установленный угол.

Работа с периферией микроконтроллера построена на прерываниях. Драйвером используется три разных прерывания: захват по синусному каналу квадратурного энкодера, захват по косинусному каналу квадратурного энкодера и переполнение таймера. В этих прерываниях ведётся подсчёт текущего угла поворота, определяется достижение заданного угла поворота и рассчитывается частота вращения.

Работа тестовой программы заключается в прохождении платформы по прямоугольной траектории движения. В основном бесконечном программном цикле осуществлён вызов соответствующих команд драйверов сервомоторов описывающих данную траекторию.

В ближайшее время планируется расширить функционал платформы до приведённой на рис. 8, структурной схеме устройства платформы.

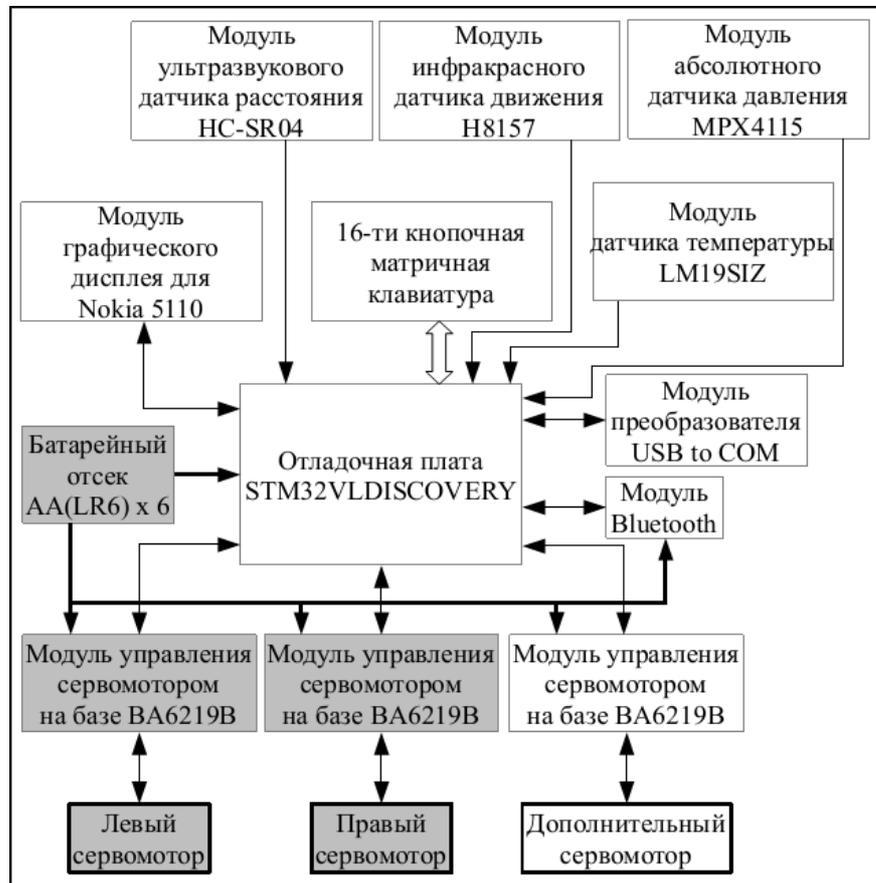


Рис. 16 Структурная схема платформы: прямоугольники с серой заливкой - реализованные модули; прямоугольники с толстыми линиями границ — стандартные модули набора *Lego Mindstorm NXT 2.0*; Прямоугольники без заливки — модули, реализация которых предстоит в дальнейшем.

ВЫВОДЫ

1. При исполнении тестовой программы, собранное и запрограммированное устройство показало принципиальную возможность построения платформы данного типа.
2. Функциональность данного устройства

может быть расширена путём добавления схемных модулей сторонних производителей.

3. Тестовое программное обеспечение задаёт шаблон для построения алгоритмической части модулей драйверов, которое может быть гибко добавлено в код при отдельной работе нескольких разработчиков.

ЛИТЕРАТУРА

[1] А. Л. Печников, В. А. Жмудь, В. Г. Трубин, А. Б. Колкер. Перспективы развития робототехнических учебных стендов для высшего специального образования в области робототехники, автоматике и мехатроники. Труды конференции Scientific World — Перспективы инновации в науке, образовании, производстве и транспорте' 2012. URL: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-212/informatics-computer-science-and-automation-212/13341-212-831> (дата обращения: 26.02.2013).

®

[2] NXT motor internals
URL: <http://www.philohome.com/nxtmotor/nxtmotor.htm> (дата обращения: 24.01.2013).

®

[3] Synthesize-your-own NXT connector plug URL: <http://www.philohome.com/nxtplug/nxtplug.htm> (дата обращения 24.01.2013).

[4] Reversible Motor Driver for Brush Motors 2.0A or More Reversible Motor Drivers (Single Motor) BA6219BFP-Y, BA6222 URL:

<http://rohmf.s.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/motor/dc/ba6219bfp-y-e.pdf> (дата обращения 24.01.2013).

[5] LEGO MINDSTORMS NXT Hardware Developer Kit. Appendix 1-LEGO MINDSTORMS NXT hardware schematic. URL:

http://cache.lego.com/Media/Download/Mindstorms2SupportFilesDownloads/otherfiles/download8CFD37F17F7EFCDC412AE7CEBF245C6A/HDK_Download1.zip (дата обращения 24.01.2013).

[6] UM0919 User Manual STM32VLDISCOVERY STM32 value line Discovery. URL:

http://www.st.com/internet/com/TECHNICAL_RESOURCES/TECHNICAL_LITERATURE/USER_MANUAL/CD00267113.pdf (дата обращения 24.01.2013).

[7] Eclipse (среда разработки) – Википедия URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Eclipse_%D1%81%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0_%D1%80%D0%B0%D0%B7%D1%80%D0%B0%D0%B1%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B8%29 (дата обращения

24.01.2013).

[8] Mentor Graphics. Embedded Software. Sourcery CodeBench Lite Edition URL:

<http://www.mentor.com/embedded-software/sourcery-tools/sourcery-codebench/editions/lite-edition/> (дата обращения 24.01.2013)



Алексей Викторович Ескин – ведущий инженер ООО «КБ Автоматика»,
e-mail: kba-elma@bk.ru



Вадим Аркадьевич Жмудь – заведующий кафедрой Автоматики НГТУ, профессор, доктор технических наук, автор более 200 научных статей, включая 10 патентов и 6 учебных пособий. Область научных интересов и компетенций – теория автоматического управления, электроника, лазерные системы, оптимизация, измерительная техника.

E-mail: oao_nips@bk.ru



Виталий Геннадьевич Трубин, зав. лаб. кафедры Автоматики НГТУ, директор ООО «КБ Автоматика». <http://www.sibindustry.ru/firm.asp?t=0&prm=9607&moid=0&tabindex=0>

Автор 18 научных статей. Область интересов – разработка специализированной электроники.

E-mail: trubin@ngs.ru

Интеллектуально-адаптивные методы обеспечения информационной сетевой безопасности

Е. А. Басыня, А. В. Гунько

Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск, Россия

Аннотация – В данной статье рассмотрена успешная реализация стохастических методов обеспечения информационной сетевой безопасности в виде системы межсетевых экранов с интеллектуально-адаптивными свойствами на базе генетической алгоритмизации и использованием выставления «ловушек».⁷

Ключевые слова – распределенные атаки, межсетевые экраны, генетическая алгоритмизация.

ВВЕДЕНИЕ

В борьбе за информационную безопасность локальной вычислительной сети ведущим пограничным войском выступает межсетевой экран с пакетным фильтром. Его реализация на сегодняшний день сводится к разработке аппаратно-программных межсетевых экранов на «жесткой» логике [1]. Это, в свою очередь, позволяет хакерам идентифицировать продукт защиты атакуемого объекта и проникнуть через уже известные уязвимости. В случае распределенных атак (например, на «отказ от обслуживания») (Рис. 1) достаточно выставить лимиты соединений.



Рис. 1. Принципиальная схема распределенных сетевых атак

Однако, для владельца это повлечет непропорциональные затраты времени и, возможно, потребует вмешательство

квалифицированного системного администратора, а тем временем информационный ресурс будет перегружен и недоступен для санкционированных соединений, либо взломан.

Предсказуемость поведения средств защиты и отсутствие систематического анализа входящего трафика предоставляет хакерам широкий спектр потенциальных возможностей для взлома объекта, либо вывода его из рабочего состояния.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью работы является выбор методов и средств реализации системы интеллектуального управления сетевым трафиком в вычислительных сетях с коммутацией пакетов, представленной в виде межсетевых экранов и пакетного фильтра с интеллектуально-адаптивными свойствами на базе стохастических методов – генетической алгоритмизации.

II. ТЕОРИЯ

Выбор стохастических методов обусловлен необходимостью динамической автономной оптимизации с низкой потенциальной возможностью прогнозирования «извне».

Локально-градиентный метод, векторно-адаптивный методы не применяются в силу проблемы «остановки» в локальных экстремумах. Больцмановское обучение, обратное распространение и адаптация Коши требуют корректировки начальной выборки, близкой к оптимальной, что в рассматриваемой задаче не может быть гарантировано. Одной из приемлемых методик является генетическая алгоритмизация (ГА) [2].

Идея генетических алгоритмов заимствована у живой природы и состоит в организации эволюционного процесса, конечной целью которого является получение оптимального решения в сложной комбинаторной задаче. Разработчик генетических алгоритмов выступает в данном случае как «создатель», который должен правильно установить законы эволюции, чтобы достичь желаемой цели как можно быстрее.

⁷ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

Поскольку качество решения обычно оценивается некоторой оценочной функцией, ГА также называют методом оптимизации многоэкстремальных функций. Никакой дополнительной информации о решаемой задаче ГА больше не имеет. В процессе эволюции популяция вырабатывает качества, необходимые для выживания и приспособления, и которые одновременно и являются оптимальным решением [3].

Генетический алгоритм - это простая модель эволюции в природе, реализованная в виде компьютерной программы. В нем используются как аналог механизма генетического наследования, так и аналог естественного отбора. При этом сохраняется биологическая терминология в упрощенном виде. Представим себе искусственный мир, населенный множеством существ (особей), причем каждое существо — это некоторое решение нашей задачи. Будем считать особь тем более приспособленной, чем лучше соответствующее решение (чем большее значение целевой функции оно дает). Тогда задача максимизации целевой функции сводится к поиску наиболее приспособленного существа. Конечно, мы не можем поселить в наш виртуальный мир все существа сразу, так как их очень много. Вместо этого мы будем рассматривать много поколений, сменяющих друг друга. Теперь, если мы сумеем ввести в действие естественный отбор и генетическое наследование, то полученный мир будет подчиняться законам эволюции. Заметим, что, в соответствии с нашим определением приспособленности, целью этой искусственной эволюции будет как раз создание наилучших решений. Очевидно, эволюция — бесконечный процесс, в ходе которого приспособленность особей постепенно повышается. Принудительно остановив этот процесс через некоторое время после его начала и выбрав наиболее приспособленную особь в текущем поколении, мы получим не абсолютно точный, но близкий к оптимальному ответу.

Поскольку в поставленной задаче некоторые экземпляры решений недопустимы (могут привести к выходу из строя информационной системы), а так же присутствуют обманные маневры, методы подмены, на которые возможно прогнозировать реакцию системы, — то потребовалась модернизация генетической алгоритмизации вводом управляющего воздействия (Рис. 2).

Для реализации предложенной системы в качестве инструментария выбрана операционная система Linux Fedora с пакетным фильтром iptables на базе Netfilter с POM (Patch-o-matic, сценариями, выполняющими наложение заплат на ядро ОС).

Основу системы составляют распространенные сценарии защиты. В дополнение к ним информационная система ведет анализ сетевого трафика на

подозрительные активности, систематизирует информацию в базе данных. Из данной информации и статистики принятия решений по ним информационная система ведет генетическую алгоритмизацию дальнейшей стратегии реагирования. Процентное соотношение генетической рулетки динамически обновляется для каждого объекта или группы объектов при фиксации принадлежащего им информационного потока: например, злоумышленник дает своему серверу команду отпустить своих «зомби-машин» на штурм web-сервера посредством атаки SYN flood.

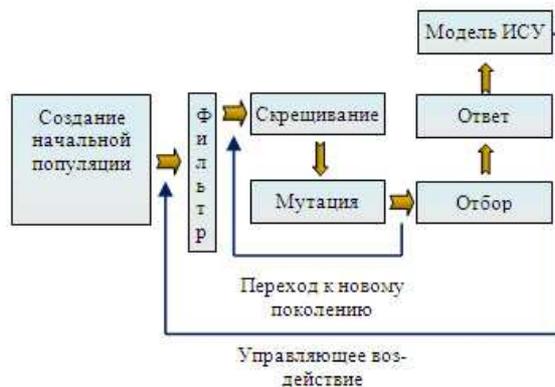


Рис. 2. Блок-схема модернизированного генетического алгоритма

Информационная система не может однозначно без априорной информации различить обычные попытки соединения от «тройных» - выставляется лимит соединений и систематизируется информация по ним. Блок генетической алгоритмизации автономно принимает решение перенаправить информационные потоки данной группы на порты-ловушки (благодаря расширению TARPIT пакетного фильтра IPTABLES) одной из специально подготовленных операционных систем на паравиртуализаторе XEN, отнимая вычислительные мощности атакующих и создавая видимость «зависания» сервера. Что провоцирует сервер атакующего прекратить атаку и вновь приступить к сканированию портов.

Благодаря таким итерациям определяется четкий круг зараженных машин и, соответственно, зачинщика. Далее система, чтобы разгрузить канал и вычислить мошенника не отклоняет пакеты от него, а перенаправляет их на иную операционную систему на паравиртуализаторе XEN, которая изолирована от локальной сети и служит для вычисления местоположения мошенника и его целей.

Преимущество генетических алгоритмов в данном случае – работа без большой начальной выборки и способность выходить на глобальный экстремум решения, минуя локальные, сохраняя достаточную пропускную способность канала.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для сравнительной оценки эффективности разработанной системы представлена диаграмма работы двух шлюзов при равноценной DDOS-атаке при прочих равных условиях (Рис.3).

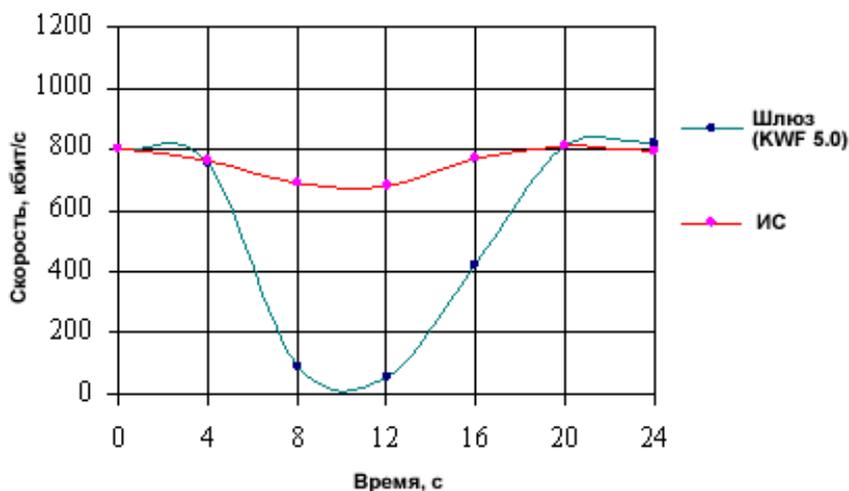


Рис. 3. Пропускная способность канала

IV. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На практике данная система хорошо себя зарекомендовала: надежно и отказоустойчиво защищает ЛВС, предотвращает перегрузку системы и канала, сохраняя режим недогруженности объектов, оставляя минимум 30% от предела системных ресурсов и пропускной способности соответственно.

В то же время, предложенная система требует значительных вычислительных мощностей. Если минимальными требованиями для шлюза на Linux Fedora являются CPU Intel Pentium II 400MHz (или аналогичные), RAM 192 Mb, Video 16 Mb, HDD 3 Gb, то для запуска предложенной информационной системы с локальным числом хостов менее 20 требуется минимум CPU: Intel Pentium 4 1.7 GHz, RAM: 1 Gb, Video NVidia GeForce или ATI Radeon с 32 Mb памяти или выше, HDD: 15 Gb (для установки всех пакетов, а так же для создания большого swar раздела). А для распределенной корпоративной ЛВС (~ 100 хостов, ~ 4 сервера) оптимальным решением будет 4х-ядерный процессор с 16 Гб оперативной памяти (если в сети функционирует сервер терминалов).

Один шлюз функционирует на Kerio Winroute Firewall (с максимальным лимитом подключения на хост – 80). Второй реализует предложенную информационную систему. В интервале времени с 4 до 20 с. проводится умышленный сетевой штурм.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Учитывая, что развитие микроэлектроники стремительно набирает обороты, требование обеспечения заявленных вычислительных мощностей не является весомым недостатком. В перспективе у интеллектуально-адаптивных методов есть все шансы вытеснить «жесткую» логику.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] В. Олифер, Н. Олифер. Компьютерные сети. Принципы, Технологии, протоколы. 4-е изд. – СПб.: Питер, 2010. – 944 с.: ил.
- [2] Растринин Л.А. Статистические методы поиска. М.: Наука. 1968. 376 с.
- [3] Щербаков П. С. Генерирование устойчивых полиномов // Стохастическая оптимизация в информатике. 2009. Вып. 5. С. 65-90.

Е. А. Басыня – Студент Новосибирского государственного технического университета.

Тел. +7 913 208 5555, E-mail: main-event@mail.ru

А. В. Гунько – Доцент Новосибирского государственного технического университета

Тел.сл. (382-2) 3461119, E-mail: gun@ait.cs.nstu.ru

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

Содержание раздела:

- Буковский М.П., Белик Д.В. Разработка комплексной биотехнической системы наблюдения и коррекции параметров жизнедеятельности организма человека во сне при синдроме обструктивного апноэ и его последствиях. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 101–106. НГТУ (Новосибирск, Россия).

Разработка комплексной биотехнической системы наблюдения и коррекции параметров жизнедеятельности организма человека во сне при синдроме обструктивного апноэ и его последствиях

Буковский М.П., Белик Д.В.

Новосибирский Государственный Технический Университет

Аннотация: В статье описывается конструкция принцип работы разработанной биотехнической системы, предназначенной для борьбы с синдромом обструктивного апноэ сна и его последствиями.

Ключевые слова: биотехническая система, обструктивное апноэ, устранение храпа, внезапная смерть во сне.

ВВЕДЕНИЕ

Синдром обструктивного апноэ сна (СОАС) – это нарушение дыхания человека во сне, связанное с падением мышечного тонуса органами верхних дыхательных путей (глотки, гортани), в связи с чем дыхание человека во сне приобретает прерывистый характер (появляется храп), а при наиболее тяжелых формах может прекращаться на длительное время (от 10 секунд до 2-3 минут) и составлять в общей сложности до 50-60% от общего времени сна. При обструктивном апноэ нарушается структура сна, появляется дневная сонливость, ухудшается память, снижается умственная и физическая работоспособность. У больных обструктивным апноэ не происходит снижения артериального давления во время сна. При возникновении апноэ давление резко повышается. В связи с этим, обструктивное апноэ является фактором риска для людей, страдающих заболеваниями сердечно-сосудистой системы — артериальной гипертензией, ишемической болезнью сердца. Повышается риск внезапной смерти человека во сне в результате остановки сердца и инсульта.

ОБЗОР СУЩЕСТВУЮЩИХ СРЕДСТВ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время существует немало консервативных методов устранения рисков, связанных с синдромом обструктивного апноэ сна. Эти методы могут улучшить общее состояние больного, снизить выраженность храпа и проявлений синдрома обструктивного апноэ. К сожалению, большинство из них имеют неустраняемые недостатки, препятствующие

использованию их в быту. В большинстве случаев эти недостатки связаны с крайним неудобством в использовании существующих приспособлений. При использовании таких средств человеком, страдающим синдромом обструктивного апноэ, резко снижается уровень комфорта его повседневной жизни, в частности сна. Те же, приборы, которые избавлены от недостатков эргономики уступают в функциональности и эффективности. Ниже рассмотрены существующие методы борьбы с синдромом обструктивного апноэ сна и его последствиями.

Существуют различные приспособления, предназначенные для уменьшения храпа, например, „подтяжки для подбородка, шейные воротники, удерживающие нижнюю и верхнюю челюсти в сомкнутом состоянии, носовые расширители и воздухопроводы, внутриротовые приспособления. Они могут способствовать снижению интенсивности храпа, но не устранять его полностью”. [1]

Наиболее надёжным и эффективными средствами борьбы с синдромом обструктивного апноэ являются приборы CPAP или BiPAP. „Лечение при помощи аппарата CPAP (Constant Positive Airway Pressure) было предложено в 1981 году. Принцип действия – создание постоянного повышенного давления воздуха в верхних дыхательных путях. BiPAP же создаёт разное давление на вдохе и выдохе, тем самым облегчая выдох. Данный вариант на сегодняшний день является наиболее эффективным методом из консервативных методов устранения СОАС. CPAP представляет собой компрессор, который при помощи гибкого шланга соединён с маской, падающей воздух в верхние дыхательные пути под давлением 5-10 см вод.ст. на протяжении всего дыхательного цикла во время сна. Действует как пневматическая распорка, препятствующая спаданию стенок глотки повышенным давлением. Однако около 30% больных вынуждены отказаться от аппарата из-за невозможности привыкнуть к маске на лице или к работающему около кровати компрессору.

46% пациентов жалуются на частые пробуждения, а 44% - на чиханье, отёк слизистой полости носа, сухость в глотке. У некоторых отмечено развитие синуситов, евстахиитов, головокружения и удушья. Высокая цена прибора и отсутствие покрытия медицинской страховкой делает невозможным его широкое применение в нашей стране. Невозможность создания портативной версии прибора ограничивает удобство использования его в быту". [1]

Существуют также портативные приборы наблюдения для борьбы с симптомами СОАС, выполненные в виде наручных часов. Такие приборы используют в своём действии данные о сатурации, кровяном давлении, тоне периферических артерий и частоте сердечного ритма, получаемые с пульсоксиметрического датчика, установленного на пальце пациента. При этом система не фиксирует самого факта храпа, а косвенно делает вывод о его наличии по снижению насыщения крови кислородом. Такой метод не может являться достоверным средством фиксирования храпа, поскольку даже при полной остановке дыхания сатурация падает до 90% спустя 40 секунд и до 80% спустя лишь 2 минуты. При этом при отсутствии длительных остановок дыхания у пациента храп на сатурацию влияет очень слабо. От длительных остановок дыхания, которые могут детектировать такие приборы, защититься при этом всё равно не удастся. Обратная связь в случае её наличия в таких приборах осуществляется электрическим воздействием в области запястья, которое вызывают привыкание пациента и в конечном итоге он просто перестанет на него реагировать. Кроме того относительно высокий порог чувствительности человека к электрическому импульсу вынудит производителей применять для воздействия большие токи, которые быстро будут растрчивать энергию аккумуляторов. Отзывы пациентов, которые использовали такие приборы в домашних условиях, показывают их крайне низкую эффективность.

РАЗРАБАТЫВАЕМАЯ СИСТЕМА

В лаборатории „БиоЭМИ” Научно-исследовательского Института Медицинской Инженерии Новосибирского Государственного Технического Университета разработана биотехническая система, позволяющая значительно повысить эффективность устранения храпа при синдроме обструктивного апноэ сна, снизить вероятность внезапной смерти человека во сне при наиболее тяжелых формах этого заболевания, а также проводить анализ состояния больного во время сна.

На *Рисунке 1* представлена структурная схема наиболее полной системы комплексного наблюдения за параметрами жизнедеятельности человека и их коррекции во сне. Сбор данных о

функционировании сердечнососудистой, дыхательной и центральной нервной систем осуществляется по трём основным каналам: канал снятия ЭЭГ, канал сбора акустических данных с микрофона, установленного на шее пациента, канал сбора данных о механических вибрациях с акселерометра, также установленного на шее пациента.

Разрабатываемая система использует в своём действии данные электроэнцефалограммы, снимаемой с пациента по одному каналу. Полученные данные используются для наблюдения за фазой и глубиной сна пациента. Суть этой идеи заключается в выделении из всего спектра электроэнцефалографического сигнала так называемого δ -ритма. δ -ритм (дельта-ритм) – один из анализируемых при снятии ЭЭГ электрических сигналов (ритмов), возникающий, как правило, при глубоком естественном сне. Для δ -ритма характерна относительно высокая амплитуда сигнала (сотни микровольт), а также полоса частот от 1 до 4 Гц.

В разрабатываемой системе сигнал, полученный с поверхности головы пациента, предварительно усиливается в тысячи раз с помощью специально спроектированного для этой цели низкочастотного усилителя. Для непосредственного снятия сигнала используются два электрода, один из которых выполняет функцию пассивного, закреплённого на шее, щеке или мочке уха пациента. Второй, активный, электрод располагается в точке головы, в которой наиболее явно проявляется δ -ритм. Усиленный ЭЭГ-сигнал подается на фильтрующий селектор δ -ритма. Его функцией является отделение искомого δ -ритма, используемого в системе, от остальных сигналов, полученных с электродов, расположенных на голове пациента. Среди „лишних” присутствуют как низкоамплитудные сигналы остальных ритмов головного мозга, так и сигналы более высокой амплитуды, возникающие вследствие сокращения мышц шеи и лица (электромиографические сигналы). Также в спектре полученного сигнала присутствуют помехи различной природы: наводки от бытовых электросетей, высокочастотные импульсы разрядов статического электричества, возникающих при трении одежды и волос пациента о постельное бельё, и т.д. От последних упомянутых помех, называемых синфазными, полезный сигнал избавляет дифференциальный усилитель с коэффициентом подавления таких помех 120-130 дБ. Сигналы высокой, относительно электроэнцефалографических, частоты, такие как миографические, подавляются с помощью входящего в блок фильтрующего селектора δ -ритма режекторного фильтра или фильтра низких частот. В полученном в результате фильтрации сигнале присутствуют близкие по частоте с δ -ритмом остальные ритмы головного

мозга. Однако среди них δ -ритм является наиболее высокоамплитудным, вследствие чего его окончательная селекция осуществляется при

выделении из спектра сигнала гармоник с наибольшей амплитудой.

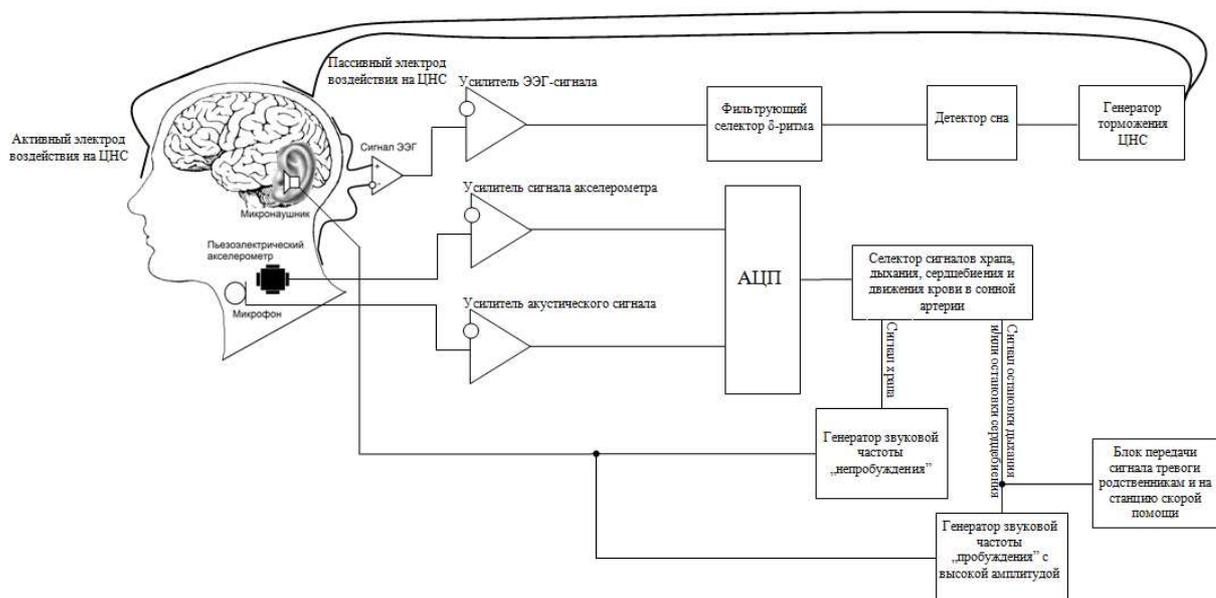


Рисунок 1. Полная структурная схема системы комплексного наблюдения и коррекции параметров жизнедеятельности организма во сне

Так как при здоровой центральной нервной системе δ -ритм возникает только в состоянии глубокого сна, то по его наличию можно судить о том, спит человек или нет, а по динамике его изменения можно оценить в какой из четырёх фаз сна пребывает мозг человека. В разрабатываемой системе эти показатели важны для создания обратной связи. При некоторых нарушениях работы сердечнососудистой, дыхательной и нервной систем состояние глубокого сна может оказаться для человека труднодостижимым. Так, например, при синдроме обструктивного апноэ сна человек может часто просыпаться из-за создаваемых им же звуков храпа, вследствие чего отсутствует полноценный глубокий сон, и как следствие, дальнейшие нарушения работы центральной нервной системы. В данном случае, а также во многих подобных ему для обеспечения возможности глубокого сна с последовательной сменой всех его фаз используется обратная связь, сопровождаемая тормозящим воздействием на центральную нервную систему. Суть обратной связи состоит в генерировании системой сигналов, тормозящих центральную нервную систему, при незапланированном выходе человека из фазы глубокого сна. За генерирование таких сигналов отвечает соответствующий блок на структурной схеме прибора. Его действие аналогично физиотерапевтическому аппарату, осуществляющему процедуру электросон.

Генератор торможения центральной нервной системы представляет собой генератор

импульсов тока низкой частоты и малой силы. Так при проведении процедуры используются импульсы тока силой до 10 мА, следующие с частотой 5-150 Гц и имеющие длительность 0,5 мс. Напряжения на электродах имеет амплитуду 50-70 В.

Установлено, что импульсный ток частотой от 5 до 150 Гц оказывает на головной мозг седативное воздействие. Механизм этого воздействия заключается в прямом и рефлекторном влиянии импульсов на кору головного мозга и подкорковые образования. Импульсный ток представляет собой слабый раздражитель, оказывающий монотонное ритмическое воздействие, в результате которого сознание человека ослабевает и он впадает сначала в состояние дремоты, а затем в глубокий сон. При проведении процедуры электросна в физиотерапевтическом кабинете частота и сила тока подбираются индивидуально к каждому пациенту. В рамках разрабатываемой системы предполагается полностью автоматизированное функционирование блока торможения ЦНС. При автоматическом режиме работы генератора, частота импульсов тока может изменяться благодаря наличию обратной связи с головным мозгом пациента (ЭЭГ-канал сбора данных). Микропроцессор, внедрённый в блок генератора торможения ЦНС, по поступающему δ -ритму, выделенному из ЭЭГ-сигнала на предыдущих этапах, будет оценивать динамику изменения глубины сна человека и по этим данным регулировать выходную частоту импульсного

тока. Это позволит использовать систему в полностью автономном режиме, не прибегая к помощи медицинского персонала, а значит, даёт возможность использовать систему не только в палатах лечебного учреждения, но также и амбулаторно.

Основная часть диагностических данных, на основании которых производится анализ функционального состояния дыхательной и сердечнососудистой систем, собирается с помощью микрофона, установленного на шею пациента. Получаемый, усиливаемый и впоследствии обрабатываемый акустический сигнал несёт в себе информацию о дыхании и сердцебиении человека.

К выбранному для разрабатываемой системы микрофону предъявляются очень жесткие требования в отношении его частотных характеристик, чувствительности и помехоустойчивости. Так, используемый в аппарате микрофон является микроэлектромеханической системой (МЭМС). Применение в разрабатываемой системе микрофона, изготовленного по технологии МЭМС, позволяет максимально миниатюризировать блок первичных преобразователей (датчиков), расположенных на шее пациента, что делает систему наиболее удобной в использовании как в больничных, так и в домашних условиях, а также минимизирует степень контакта датчиков с посторонними предметами (постельным бельём и одеждой пациента). Последний фактор весьма важен, поскольку в дальнейшем при обработке полученных данных сигналы, возникающие при контакте датчика с посторонней поверхностью, могут быть расценены как патологические, хотя на самом деле являются не более чем артефактами. Помимо миниатюрности выбранный микрофон обладает превосходными частотными характеристиками (полоса пропускания от 10 Гц до 20 кГц), а также высокой помехозащищённостью, что обеспечивается встроенным в конструкцию микрофона дифференциальным предусилителем.

Сигнал, полученный с предусилителя микрофона поступает на специально спроектированный дифференциальный усилитель, обеспечивающий усиление слабого акустического сигнала до сотен раз, а также подавление синфазных (наведённых) помех.

Для выделения из всего спектра акустического сигнала спектральных составляющих, наиболее характерных для звуков дыхания, сердцебиения и храпа различной природы, а также звука движения крови по сонной артерии, используется специально спроектированный для этой цели селектор. Сигналы, рассматриваемые здесь, имеют значительно более сложные спектральные характеристики, нежели сигналы ЭЭГ, рассмотренные выше. Спектры этих

сигналов сильно накладываются друг на друга, а потому их селекция представляет собой очень сложную задачу. Для её решения требуется проектирование множества полосовых фильтров, имеющих чётко ограниченную полосу пропускания. Порядок этих фильтров, а также точность, предъявляемая к компонентам, используемым при их проектировании, не позволяют создать этот блок системы, оперируя лишь с аналоговой электроникой. Поэтому для решения этой задачи предполагается использование цифрового микроконтроллера, на котором программными средствами будет реализован блок селекции сигналов. Учитывая это, сигнал, поступающий с микрофонного усилителя, предварительно должен быть оцифрован. Для этой цели используется аналого-цифровой преобразователь (АЦП), характеристики которого должны удовлетворять следующим требованиям. Скорость аналого-цифрового преобразования, определяется тактовой частотой микросхемы АЦП, по теореме Котельникова она должна быть минимум вдвое больше наивысшей частоты, содержащейся в спектре сигнала. Верхняя частота спектра исследуемого сигнала равна максимальной частоте полосы пропускания микрофона и составляет 20 кГц. Следовательно, частота дискретизации микросхемы АЦП должна составлять не менее 40 кГц. Важна также разрядность АЦП преобразователя.

Селектор сигналов дыхания, храпа, сердцебиения и кровотока, как было указано выше, работает на основе множества полосовых фильтров. Каждый фильтр выделяет полосу частот, для которых проявление того или иного сигнала является наиболее характерным. При наличии спектральных характеристик „отвечающих” за определённый сигнал, срабатывает детектор этого сигнала. В случае обнаружения в спектре сигнала гармоник, указывающих на наличие храпа, сигнал детектора активирует специально спроектированный генератор так называемых звуковых частот „непробуждения” определённой амплитуды. Эти частоты подаются на установленный в ушном канале пациента микронаушник. Частоты „непробуждения” воздействуют на нервную систему человека, однако не приводят к его пробуждению. Ответом нервной системы на такой раздражитель является моторная реакция организма, то есть движения конечностей, сокращение мимических мышц и мышц гортани. В результате человек либо меняет свое положение либо восстанавливается тонус глотки, что в конечном итоге устраняет храп и все его негативные последствия.

Селектор сигналов также детектирует гармоники, соответствующие дыханию и сердцебиению пациента. При их наличии система работает в штатном режиме, осуществляя слежение за глубиной сна человека

и наличием храпа. При появлении признаков остановки дыхания или сердцебиения система немедленно отреагирует, подав на микронаушник высокоамплитудный раздражающий сигнал. Следующая за ним реакция нервной системы человека, скорее всего, приведет моментальному восстановлению дыхания и/или сердцебиения. Если же этого не происходит система автоматически через встроенные модули связи (GSM, GPRS, 3G, Ethernet, WiFi) оповестит ближайших родственников пациента, лечащего врача, а также отправит вызов на станцию скорой помощи. Такая своевременная реакция может предотвратить внезапную смерть человека во сне и снизить риск таковой у групп людей, наиболее ей подверженных.

Канал сбора данных о механических вибрациях работает на основе первичного преобразователя, представляющего собой высокочувствительный акселерометр. Акселерометр преобразует механические вибрации (колебания) в электрический сигнал пропорциональной частоты и амплитуды. Предполагается устанавливать акселерометр рядом с микрофоном на шее пациента. Акселерометрический канал сбора данных введён в конструкцию системы в качестве вспомогательного акустическому каналу. Поскольку преобразуемый микрофоном в электрический сигнал звук также является по своей природе механическими колебаниями, сигналы, получаемые с микрофона и акселерометра в целом пропорциональны друг другу. Однако акселерометр в определённых частотных областях всё же имеет большую чувствительность, чем даже микрофон, выполненный по технологии МЭМС, а также меньше подвержен возникновению артефактов. Это связано с тем, что в соответствии с принципом действия микрофон предполагает наличие воздушного зазора между источником сигнала и чувствительным элементом, тогда как акселерометр предназначен для непосредственного контакта с источником вибраций. Введение в систему акселерометрического канала сбора данных даёт возможность не только увеличить надёжность работы системы при обработке данных о храпе, дыхании и сердцебиении, но и собирать и обрабатывать данные, недоступные для получения с использованием только лишь микрофона. К таким данным относятся низкочастотные (< 10 Гц) сигналы, а также сигналы, имеющие маленькую амплитуду, принятие которых с использованием микрофона, не представляется возможным из отражения акустических волн от границ раздела твёрдой и воздушной сред и затухания их при прохождении через последнюю. Так, например, сигнал, создаваемый кровотоком в сонной артерии, который, предположительно, может

быть принят с помощью акселерометра и выделен селектором может нести ценные диагностические данные для исследования кровообращения головного мозга и предотвращения инсульта.

В остальном действие акселерометрического канала сбора данных аналогично акустическому каналу.

В связи с возможностью использования блоков предложенной системы отдельно друг от друга, при проведении опытно-конструкторской работы был выбран модульный принцип построения системы. Описанная выше система, структурная схема которой изображена на Рисунке 1, может разбиваться на модули, используемые отдельно от остальных в зависимости от цели, преследуемой при её использовании с данным пациентом.

1. Наиболее простая биотехническая система может быть построена на основе микрофона с блоком усиления, АЦП, упрощённого варианта селектора гармоник, выделяющего только гармоники храпа, генератора звуковых частот „непробуждения” и микронаушника. Назначением такой системы является устранения храпа как фактора риска для ряда заболеваний при непробуждении человека. Полученная система портативна, при этом датчик должен быть закреплён на шее пациента, а электронная часть системы может быть установлена за раковиной уха, на груди или плече в зависимости от индивидуальных предпочтений пользователя. Система работает автономно от бытовых источников электроэнергии на аккумуляторе или батарее.

2. Более сложная система, предназначенная для предотвращения внезапной смерти во сне в результате остановки дыхания и сердцебиения, может быть построена на основе микрофона и/или акселерометра сопряжённого с блоком усиления, АЦП, селектором гармоник, отвечающих за дыхание и сердцебиение, генератора пробуждающих частот и микронаушником. Дополнительно также может быть установлен модуль экстренной связи с близкими родственниками, лечащим врачом и станцией скорой помощи. Полученная система также может быть выполнена как портативная, работающая от аккумулятора, для использования в домашних условиях. Блок связи посредством беспроводных сетей должен при этом иметь устойчивое соединение с ретранслирующими и маршрутизирующими устройствами.

3. Отдельно может быть реализована система для людей, страдающих бессонницей, и другими заболеваниями нервной системы, связанными с нарушением целостности и структуры сна. Эта система будет содержать в себе ЭЭГ-канал сбора данных с сопряжённым с ним генератором торможения ЦНС. Такая система может быть выполнена в стационарном

виде с необходимостью подключения к бытовой электросети, поскольку генератор торможения ЦНС потребляет значительное количество мощности.

4. Комбинация рассмотренных систем позволяет построить наиболее полную комплексную систему наблюдения и коррекции сна. Данная биотехническая система применима для устранения отягощенных последствий СОАС, таких как приступ удушья, инфаркт, инсульт, аритмия и внезапная смерть. Такая система может быть выполнена только в стационарном варианте и может использоваться как в домашних условиях, так и в лечебно-профилактических учреждениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При создании настоящей биотехнической системы была проведена следующая научно-исследовательская работа:

1. Оценка амплитудно-частотных характеристик аудио-сигнала храпа человека различной природы и других диагностических показателей;

2. Клинические исследования, направленные на определение частоты „непробуждения“;

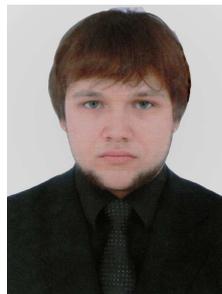
3. Работа по оценки амплитудно-частотных характеристик аудио-обстановки в постели пациента и рядом с ним;

4. Оценка амплитудно-частотных характеристик вибро-сигналов, получаемых с поверхности тела пациента во сне.

Следует отметить, что в настоящее время проводится научно-исследовательская работа совместно с НИИ физиологии и фундаментальной медицины СО РАМН на базе Сомнологического Центра Клиники Института.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Владыкина Е.В. Устранить храп – дело техники. Hi+Med: Высокие технологии в медицине. 2011.



Буковский Максим Павлович – студент II курса магистратуры НГТУ, факультета АВТ; лаборант Научно-Исследовательского Института Медицинской Инженерии НГТУ.

E-mail:
maxim.bukovsky@mail.ru



Белик Дмитрий Васильевич – д.т.н., доцент, зав. кафедрой ССОД НГТУ, академик РАЕН, АМТН.

E-mail:
ssod@tiger.cs.nstu.ru

**IV. Облачные технологии.
Национальная программная
платформа**

Содержание раздела:

- Матренин П.В. Разработка и исследование адаптивных методов роевого интеллекта в задачах календарного планирования. Автоматика и программная инженерия. 2013. № 1 (3). С. 109–114. НГТУ (Новосибирск, Россия)

Разработка и исследование адаптивных методов роевого интеллекта в задачах календарного планирования

П.В. Матренин
НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация. Проведен анализ методов роевого интеллекта и предложен новый подход к исследованию и повышению эффективности этих методов в области задач календарного планирования. Предложенный подход основан на эволюционной адаптации параметров алгоритмов к условиям каждой конкретной задачи с помощью генетического алгоритма.

Ключевые слова: роевой интеллект, адаптация, метод колонии муравьев, метод роя частиц, генетический алгоритм, календарное планирование.

ВВЕДЕНИЕ

Во всех сферах деятельности для достижения требуемого результата необходимо составлять расписания и планы. Актуальность планирования особенно возросла с развитием средств автоматизации.

Задачи календарного планирования отражают процесс распределения во времени ограниченного числа ресурсов, выделяемых для выполнения проекта, который включает заданный перечень взаимосвязанных работ. Под ресурсами могут пониматься трудовые ресурсы, рабочие центры, станки, аудитории, ЭВМ. Под работами обычно понимают действия для достижения результата (выполнение заказа, обработка партии деталей, сборка узла, проведение занятия, выполнение расчетов).

Эффективное планирование приводит к экономии времени, ресурсов, упрощает анализ сложившейся ситуации и повышает конкурентоспособность организации.

1. ФОРМАЛИЗОВАННАЯ ЗАПИСЬ ЗАДАЧИ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

В общем случае задача календарного планирования может быть описана следующим образом [1].

Заданы конечное множество $N=\{1,2,\dots,n\}$ требований и конечное множество $M=\{1,2,\dots,m\}$ приборов.

Процесс обслуживания каждого требования i включает r_i стадий. При этом каждому i и каждой его стадии q ($1 \leq q \leq r_i$) сопоставляется некоторое подмножество приборов M_q^i из M . Считается, что каждый прибор в каждый конкретный момент времени может либо обслуживать одно и только одно требование, либо бездействовать

(простаивать). В таких системах с для каждого требования i задается своя, характерная для этого требования последовательность L^i его обслуживания приборами:

$$L^i = \{l_1^i, l_2^i, \dots, l_{r_i}^i\}. \quad (1)$$

Требование i сначала обслуживается прибором l_1^i , затем прибором l_2^i и т.д. Последовательности обслуживания могут быть различными для разных требований и могут содержать повторения приборов. Если требование i на стадии q должно быть обслужено прибором l , то предполагается заданной длительность t_{liq} его обслуживания этим прибором. Процесс функционирования системы может быть описан путем задания расписания (календарного плана, плана-графика), т.е. некоторой совокупности указаний относительно того, какие именно требования, какими именно приборами обслуживаются в каждый момент времени.

При принятых выше предположениях расписание можно рассматривать как вектор $\{s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)\}$, компоненты которого являются кусочно-постоянными непрерывными слева функциями. Каждая из них задана на интервале $0 \leq t < \infty$ и принимает значения $0, 1, \dots, n$.

$$s = \{s_1(t), s_2(t), \dots, s_m(t)\} \quad (2)$$

Если $s_l(t) = i$, $l \in M$, $i \in N$, то в момент времени t прибор l обслуживает требование i . При задании расписания должны соблюдаться все условия и ограничения, вытекающие из постановки рассматриваемой задачи, то есть расписание должно быть допустимым.

Если существует несколько допустимых расписаний, необходимо выбрать лучше из них, то есть задать некоторый критерий выбора (критерий качества). Обычно за такой критерий берется время завершения выполнения всех требований, то есть время завершения последнего требования. Каждое допустимое расписание s однозначно определяет вектор

$$T(s) = (T_1(s), T_2(s), \dots, T_n(s)) \quad (3)$$

моментов завершения выполнения всех требований.

Задается некоторая действительная неубывающая по каждой из переменных функция

$F(x) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Тогда качество расписания s оценивается значением этой функции при $x=T(s)$:
 $F(x) = \max\{x_i\}$, $i=1, n$. В этом случае:

$$F(T(s)) = T_{\max}(s), \text{ где } T_{\max}(s) = \max\{T_i(s)\}, i=1, n. \quad (4)$$

Основные сложности такой задачи планирования: дискретность; многовариантность; многофакторность; целевая функция рассчитывается только алгоритмически. Данная постановка (ее так же называют в литературе job-shop problem) может считаться базовой, путем добавления критериев и ограничений можно перейти от нее к другим классам задач теории расписаний.

2. МЕТОДЫ РЕШЕНИЯ

Существует несколько классов методов решения таких задач.

Метод полного перебора всех вариантов теоретически позволяет найти точное решение, но не используется, так как требует колоссальных затрат времени, даже для задач небольшой размерности при использовании мощных вычислительных систем. Как показано в [2], сложность алгоритма полного перебора для задачи с n требованиями и m приборами, если каждое требование содержит t этапов в различных последовательностях, составляет $O((n!)^m)$.

Методы направленного перебора, например, ветвей и границ, применимы только для некоторых частных случаев, например, когда все технологические маршруты одинаковы или используются не более двух станков [1]. Для более сложных задач точные методы либо занимают слишком длительное время, либо не разработаны из-за сложности формализованной записи задач.

Поэтому используются различные **эвристические**, приближенные методы. Очень эффективными являются методы, основанные на **механизмах, которые используются в природе**, например генетические алгоритмы, нейронные сети, роевой интеллект, и обеспечивают эффективную адаптацию живых существ к окружающей среде на протяжении миллионов лет. Именно на этих методах основан предложенный в данной работе адаптивный метод роевого интеллекта.

3. КОНЦЕПЦИЯ РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Концепция роевого интеллекта возникла относительно недавно, в 1989 г. [3], и основана на **коллективном поведении децентрализованных самоорганизующихся систем**. Такие системы состоят из множества простых агентов, локально взаимодействующих друг с другом и с внешней средой для достижения предопределенной цели.

Взаимодействие агентов позволяет достичь **синергического эффекта** и успешно решать очень сложные задачи. В качестве примера таких систем из природы можно привести колонию муравьев,

пчелиный рой, стаю птиц, косяк рыб. Каждая из перечисленных систем характеризуется относительно простым поведением отдельных элементов и возникающим сложным интеллектуальным общим поведением.

Преимуществами методов роевого интеллекта являются:

- масштабируемость, возможность решать задачи независимо от их размерности;
- гибкость, системы не имеют жесткой структуры, могут без изменений использоваться с совершенно различных областях;
- простота правил поведения отдельных элементов;
- эффективность решения оптимизационных задач по качеству и скорости.

При переходе к математическим моделям, примеры которых приведены ниже, вводятся так называемые эвристические коэффициенты.

Важным свойством всех методов роевого интеллекта является **зависимость их эффективности от используемых в них коэффициентов** [4,5]. Поскольку они могут принимать бесконечное число значений из некоторого диапазона, постольку встает вопрос о способе их подбора. Целесообразно применить для этого **генетический алгоритм**, действуя по аналогии с природой, использующей эволюцию для естественного отбора. На данный момент предложенный подход реализован и исследован для методов колонии муравьев и роя частиц.

4. МЕТОД КОЛОНИИ МУРАВЬЕВ

Метод колонии муравьев предложен в начале 90-х годов году бельгийским ученым Марко Дориго. Метод называется так, потому что в нем используются математические модели, основанные на процессе поиска муравьями кратчайших путей к пище [5].

Муравьи решают задачи поиска путей с помощью химической регуляции [5]. Каждый муравей при движении оставляет за собой на земле дорожку особых веществ – феромонов. Чем больше по некоторому пути прошло муравьев, тем заметнее для них след, а чем более заметен след, тем большее муравьев он привлекает. Движение по короткому пути занимает меньше времени, поэтому выбравшие его муравьи успеют пройти по нему большее число раз, чем другие муравьи пройдут по длинному пути. Поэтому на коротких путях образуется больше феромона, они привлекает все большее число муравьев, таким образом, процесс поиска более короткого пути быстро завершается.

Так как поведение каждого муравья определяется простыми правилами, то и алгоритм получается очень простым и сводится к многократному обходу некоторого графа, дуги которого имеют не только вес (в общем случае они могут и не иметь собственного веса), но и динамически меняющуюся характеристику, называемую количеством феромона.

Таким образом, в основе модели лежит

косвенный обмен информацией между агентами (муравьями) через особую среду, представленную взвешенным графом (феромоновым графом). Кроме того, выбор дуги муравьем происходит не детерминированно, а стохастически, что позволяет находить новые решения.

Существует большое количество модификаций муравьиного алгоритма. В работе автором данной статьи [6] показано, как муравьиный алгоритм может быть применен для задачи календарного планирования и какие в нем применялись формулы. При этом использовались 5 коэффициентов: α , β , γ , ρ и λ .

Выбор компоненты решения осуществляется по правилам вероятностного выбора на каждом шаге построения решения в соответствии с

$$P_k = \frac{(f_k)^\alpha}{\sum_i (f_i)^\alpha} \quad (5)$$

Коэффициент α определяет степень влияния количества феромона на k -й дуге (f_k) на вероятность того, что муравей выберет эту дугу. В знаменателе сумма по всем доступным из узла дугам.

Если F – значение целевой функции на маршруте, то количество феромона, нанесенного муравьем на все дуги маршрута Δf можно определить как:

$$\Delta f = \left(\frac{F}{\gamma}\right)^\beta \quad (6)$$

Здесь β и γ – коэффициенты интенсивности нанесения феромона.

После каждой итерации количество феромона на дугах графа уменьшается (испаряется), от значения f до f' . Испаряемость феромона характеризуется коэффициентом ρ . При этом считается, что на дугах всегда должно оставаться некоторое минимальное не нулевое количество феромона (f_{min}). Максимальное значение (f_{max}) так же ограничено. Коэффициент принимает значения от 0 до 1. Таким образом, после испарения количество феромона на каждой дуге графа изменится следующим образом:

$$f' = \begin{cases} f(1-\rho), & f_{min} < f(1-\rho) < f_{max} \\ f_{min}, & f(1-\rho) \leq f_{min} \\ f_{max}, & f(1-\rho) \geq f_{max} \end{cases} \quad (7)$$

После испарения на все дуги пути, соответствующего лучшему результату, на каждой итерации добавляется некоторое количество феромона, которое определяется коэффициентом λ . Итоговое количество феромона равняется f'_{best}

$$f'_{best} = \begin{cases} f_{best} \cdot \lambda, & f_{best} \cdot \lambda < f_{max} \\ f_{max}, & f_{best} \cdot \lambda \geq f_{max} \end{cases} \quad (8)$$

5. МЕТОД РОЯ ЧАСТИЦ

Метод роя частиц был изначально разработан для моделирования социального поведения и основан на поведении стай птиц [7]. В 1995 году Дж. Кеннеди и Р. Эберхарт предложили этот метод для оптимизации.

Основная идея метода заключается в перемещении частиц в пространстве решений. Пусть решается задача нахождения минимума (максимума) функции вида $f(X)$, где X – вектор варьируемых параметров, которые могут принимать значения из некоторой области D . Тогда каждая частица в каждый момент времени характеризуется значением параметров X из области D (координатами точки в пространстве решений) и значением оптимизируемой функции $f(X)$ (привлекательностью данной точки). При этом частица “помнит” наилучшую точку в пространстве решений, в которой была, и стремится в нее вернуться, но подчиняется также закону инерции и имеет склонность к небольшому стохастическому изменению направления движения. Однако этих правил недостаточно для перехода к системе, так как не заданы связи между элементами. В качестве связи используется так называемая общая память, суть которой в том, что каждая частица знает координаты наилучшей точки среди всех, в которых была любая частица роя. То есть наилучшее решение, найденное роем в каждый момент времени известно всем его частицам. В итоге на движение частицы влияют стремление к своему наилучшему положению, стремление к наилучшему среди всех частиц положению, инерционность и случайные отклонения.

Классический алгоритм очень просто и использует только 3 коэффициента: α_1 , α_2 и ω . При этом используются следующие формулы.

$$V_{ij+1} = V_{ij}\omega + \alpha_1(P_{ij} - X_{ij})r_1 + \alpha_2(G - X_{ij})r_2 \quad (9),$$

$$X_{ij+1} = X_{ij} + V_{ij+1} \quad (10),$$

где v_{ij} – скорость i -й частицы на j -й итерации алгоритма, p_{ij} – координаты наилучшей точки в пространстве решений, в которой была i -я частицы от первой до j -й итерациях алгоритма, x_{ij} – координаты позиции i -й частицы на j -й итерации алгоритма, G – координаты наилучшей точки, которая была найдена роем на момент j -й итерации, r_1 и r_2 – случайные числа, равномерно распределенные в интервале $[0,1)$.

Коэффициенты α_1 и α_2 определяют значимость для частицы памяти о своем лучшем положении и лучшем среди всего роя положении. Коэффициент ω характеризует инерционные свойства частиц, то есть насколько скорость на предыдущем шаге влияет на скорость на текущем шаге.

Кроме того, часто вводятся различные правила, определяющие поведение частицы при достижении границы области поиска.

6. РАЗРАБОТАННЫЙ МЕТОД АДАПТАЦИИ

Как отмечено выше, предлагается использовать генетический алгоритм как надстройку над алгоритмами роевого интеллекта, которая проводила бы подбор коэффициентов.

Полученный алгоритм для муравьиной колонии изложен в [6], для других методов различие будет лишь в количестве коэффициентов. Схема работы может быть описана следующим образом.

1. Генерация случайного начального состояния. Первое поколение создается из произвольно выбранных наборов коэффициентов, каждый из коэффициентов соответствует гену в хромосоме.

2. Вычисление коэффициента выживаемости. Для каждого набора коэффициентов выполняется решение задачи календарного планирования алгоритмом роевого интеллекта, значение целевой функции задачи календарного планирования и будет значением функции приспособленности.

3. Хромосомы, имеющие большую выживаемость, отбираются для скрещивания и мутации с большей вероятностью.

4. После скрещивания и мутации для полученной новой популяции выполняется шаг 2.

Процесс выполняется пока не будет достигнут критерий остановки. Например, пока не будет исчерпано отведенное время решения, количество итераций или пока не будет найдено решение не хуже некоторого заранее заданного.

Лучшие наборы коэффициентов отбираются для следующих итераций, проходят скрещивание и мутацию, таким образом, достигается адаптация к каждой решаемой в данный момент задаче. Схема

предложенного подхода показана на рисунке 1.

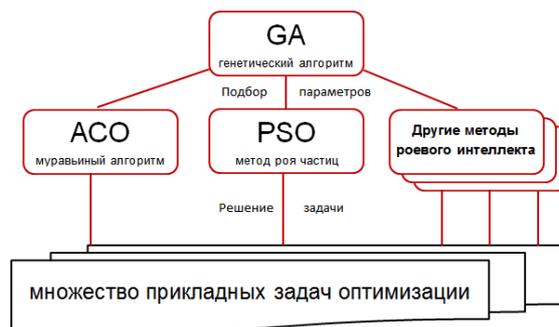


Рис.1. Схема предложенного адаптивного метода

Предложенный метод отличается большой гибкостью. Из приведенной выше схемы можно заметить, что он не зависит ни от вида задачи оптимизации, ни от выбора алгоритма роевого интеллекта и его реализации, что выделяет его среди других способов подбора коэффициентов.

7. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования эффективности предложенного метода применялись всемирно распространенные тестовые задачи [8,9,10] задачи из литературы, посвященной вопросам планирования многостадийных систем [1,11], производственная задача обработки станочных плит [13]. Далее приведены результаты по некоторым из них. В таблице 1 показаны результаты для метода колонии муравьев. В таблице 2 аналогичные результаты для метода роя частиц. Таблица 3 содержит результаты сравнения с другими авторами [13].

Таблица 1

Повышение эффективности при адаптации коэффициентов метода колонии муравьев

Задача	Размерность			Результат без адаптации		Результат с адаптацией	Число муравьев	Число итераций
	n	m	I_{\max}	средний	лучший			
abz6	10	10	10	1005,3	980	945	1000	100
ft06	5	5	5	55,16	55	55	30	10
ft10	10	10	10	1038,8	1017	950	1000	100
la01	10	5	5	673,08	666	666	30	10
la10	15	5	5	958	958	958	1000	100
la15	20	5	5	1220,6	1211	1207	1000	100
la17	10	10	10	809,32	796	784	1000	100
la21	15	10	10	1168,1	1121	1107	1000	100
3plity	3	6	22	664,782	657,55	657,55	30	10
pr_6x10	6	6	10	113,22	109	107	30	10

Таблица 2

Повышение эффективности при адаптации коэффициентов метода роя частиц

Задача	Размерность			Результат без адаптации		Результат с адаптацией	Число муравьев	Число итераций
	n	m	l_{max}	средний	лучший			
abz6	10	10	10	1003,6	951	943	100	100
ft06	5	5	5	992,1	55	55	10	5
ft10	10	10	10	690,97	937	937	300	300
la01	10	5	5	963,47	666	666	100	20
la10	15	5	5	1267,63	958	958	10	5
la15	20	5	5	815,1	1217	1207	50	50
la17	10	10	10	1143,17	794	784	100	100
la21	15	10	10	681,24	1091	1085	500	500
3plity	3	6	22	116,87	659,5	657,55	50	10
pr_6x10	6	6	10	1003,6	110	107	50	10

Таблица 3

Сравнение результатов с наилучшими известными в мире

Задача	Адаптивный метод колонии муравьев	Адаптивный метод роя частиц	Лучший известный в мире результат
abz6	945	943	943
ft06	55	55	55
ft10	950	937	930
la01	666	666	666
la10	958	958	958
la15	1207	1207	1207
la17	784	784	784
la21	1107	1073	1048
3plity	657,55	657,55	657,55
pr_6x10	107	107	107

В тестовых задачах считается, что все длительности заданы с условных временных единицах, но задача “3plity” является реальной, в которой все длительности измерялись в часах. Поэтому для определенности будет полагать, что все указанные в таблицах результаты показывают длительности полученных планов в часах.

Из таблиц 1,2 видно, что планы, полученные с адаптацией, значительно **эффективнее не только средних, но даже и лучших результатов**, полученных при ручном подборе коэффициентов. Аналогичные результаты зафиксированы и для метода роя частиц. Повышение эффективности можно объяснить тем, что подбор параметров снижает риск сходимости процесса поиска решения к локальным неэффективным экстремумам. Кроме повышения качества решений, значительно снижаются и трудозатраты на их получение, так как отпадает необходимость подбирать коэффициенты вручную. Это особенно важно для задач исследования и сравнения различных методов. Например, получить для задачи “abz6” результат лучше 980 часов методом колонии муравьев авторам не удавалось очень долгое время, пока не была выдвинута идея об адаптации, после

ее реализации сразу же был получен результат 945 часов.

В [13] приводятся наилучшие результаты по задачам [8,9,10], которые были получены **различными авторами при использовании различных методов**. Сравнение показало, что по многим задачам полученные в данной работе результаты оказались такими же. По некоторым тестовым задачам они хуже, но наибольшее относительное отклонение не превысило **5%** для метода колонии муравьев и **3%** для метода роя частиц.

8. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

Разработанные алгоритмы и программные решения могут быть применены в следующих областях:

- производственные системы;
- разработка программного обеспечения;
- учебные заведения;
- системы массового обслуживания;
- все сферы применения управления проектами.

На сегодняшний день существует множество программных продуктов для составления планов и

расписаний. Однако многие из них не используют алгоритмы оптимизации [14], создавая лишь допустимые планы. Большинство коммерческих продуктов дороги, избыточны по своей функциональности, их внедрение требует больших временных затрат, обучения персонала и изменения бизнес-процессов [14].

Разработанные в рамках данной работы алгоритмы и программные модули отличаются универсальностью, могут быть легко модифицированы под различные прикладные задачи планирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен **универсальный способ адаптации всех методов роевого интеллекта**, что значительно улучшает полученные календарные планы. Предложенный подход позволяет составлять расписания для большого класса многостадийных обслуживающих систем.

Направления дальнейшей работы:

- 1) исследование зависимостей между задачами и наилучшими параметрами алгоритмов;
- 2) реализация адаптивного метода для других алгоритмов роевого интеллекта;
- 3) развитие и оптимизация разработанного программного продукта, внедрение.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Танаев В.С. Теория расписаний. Многостадийные системы/ В.С. Танаев, Ю.И. Сотсков, В.А. Струевич. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1989. – 328с.

[2] Gromicho J. Exponentially better than brute force: solving the job-shop scheduling problem optimally by dynamic programming/ J. Gromicho, J. van Hoorn, F. Saldanha-da-Gama, G. T. Timmer. [Электронный ресурс] URL: <http://dare.uvu.vu.nl/bitstream/handle/1871/37989/Solving%20the%20job-shop%20scheduling%20problem%20optimally%20by%20dynamic%20programming.pdf?jsessionid=9FAC88F6A63C4CAF76B4CEBDEC5B1F62?sequence=2>.

[3] Beni, G., Wang, J. Swarm Intelligence in Cellular Robotic Systems, Proceed. NATO Advanced Workshop on Robots and Biological Systems, Tuscany, Italy, June 26–30 (1989).

[4] Pedersen M. Tuning & Simplifying Heuristical Optimization/ Pedersen M. // University of Southampton, School of Engineering Sciences, Computational Engineering and Design Group. 2010. [Электронный ресурс] URL: <http://www.hvass-labs.org/people/magnus/thesis/pedersen08thesis.pdf>

[5] Dorigo M. The Ant System: Optimization by a colony of cooperating agents/ M. Dorigo, V. Maniezzo, A. Colomi // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics – Part B. 1996. V. 26. No. 1. [Электронный ресурс] URL: <ftp://iridia.ulb.ac.be/pub/mdorigo/journals/IJ.10-SMC96.pdf>

[6] Матренин П.В. Оптимизация адаптивного алгоритма муравьиной колонии на примере задачи календарного планирования /П.В. Матренин, В.Г. Секаев// Программная инженерия, 2013. №4.

[7] J. Kennedy and R. C. Eberhart, Particle Swarm Optimization. Proc. of IEEE International Conference on Neural Network, Piscataway, NJ. Pp.. 1942-1948 (1995).

[8] Adams J., Balas E.,Zawack D. The shifting bottleneck procedure for job shop scheduling// Management Science. 1991. №34. P. 391–401.

[9] Fisher H., Thompson G. Probabilistic learning combination of local job-shop scheduling rules, in Industrial Scheduling. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1963.

[10] Lawrence S. Supplement to “resource constrained project scheduling: an experimental investigation of heuristic scheduling techniques”// tech. rep., GSIA, Carnegie Mellon University, October

1984.

[11] Петров В.А. Планирование гибких производственных систем / В.А. Петров, А.Н. Масленников, Л.А. Осипов. – Л.: Машиностроение, 1985. – 182с.

[12] Секаев В.Г. Использование алгоритмов комбинирования эвристик при построении оптимальных расписаний// Информационные технологии. 2009. №10. С. 61–64.

[13] Pezzella F., Merelli E. A tabu search method guided by shifting bottleneck for the job shop scheduling problem // European Journal of Operational Research. 2000. №120. P 297–310.

[14] Фролов Е.Б. MES-системы, как они есть или эволюция систем планирования производства / Е.Б. Фролов, Р.Р. Загидуллин. [Электронный ресурс] URL: <http://www.management.com.ua/ims/ims142.html>.

Матренин Павел Викторович – магистрант кафедры Автоматизированных систем управления НГТУ, автор более 10 научных статей. Область научных интересов и компетенций – стохастические алгоритмы оптимизации, роевой интеллект, информационные системы.

E-mail: pavel.matrenin@gmail.com.

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

Содержание раздела:

- Н.Р. Рахимов. Оптоэлектроника вчера, сегодня, завтра. Автоматика и программная инженерия. 2013. 1(3). С.117–120. ФГБОУ ВПО СГГА (Новосибирск, Россия).
- В.И. Гужов, П.А. Бердников, Р.А. Кузнецов. Математическая модель распространения света в пространстве. 2013. 1(3). С.121–127. ФГБОУ ВПО НГТУ (Новосибирск, Россия).

Оптоэлектроника вчера, сегодня, завтра

Нематжон Рахимович Рахимов, ФГБОУ ВПО СГГА, Новосибирск

Аннотация: Статья предназначена для абитуриентов и студентов, заинтересованных в получении образования в области разработки и применения оптических устройств и систем.

Ключевые слова: оптоэлектроника, оптика, оптические системы.

Современная электронная техника быстро расширяет свой физический плацдарм. Это связано с возможностью кодирования и обработки информации на основе самых различных форм.

В электронике информация переносится импульсами электрического тока, а он, как известно, представляет собой поток электронов в электрическом поле. Соответственно, носителем информации в электронике является электрон.

Если под тем же углом зрения взглянуть на оптику, то аналогом электрического тока предстанет оптическое излучение или световые волны, а попросту – световые лучи, поэтому носителями информации в оптике выступают частицы оптического излучения – фотоны.

Оптика начала свой путь как чисто прикладная наука. Ее целью было расширение и уточнение зрительной информации с помощью различных линз, призм, объектив и зеркал. С первых шагов она устремилась в космос и микромир, и именно в этих сферах оптические устройства наиболее широко обогатили человеческие знания.

Электроника, как известно, формировалась главным образом в виде электровакуумного приборостроения различного назначения. Только созданный в 1948 году транзистор однозначно повернул электронику в сторону твердотельных полупроводниковых приборов, переведя эту отрасль электротехники в качественно новую фазу развития. В начале 60-х годов появились кремниевые интегральные схемы, ознаменовавшие переход электроники к высшей стадии ее современного развития – микроэлектронике. Действительно, в настоящее время интегральная схема, содержащая миллионы транзисторов на одном кристалле и выполняющая функцию целой ЭВМ, сверхдолговечная, технологичная и дешевая, – это ли не идеал?!

Громадные перемены сулит возникающий союз оптики и электроники. С первых шагов электроники на стыке ее с оптикой стали возникать новые задачи, сначала разрозненные, а затем объединяющиеся в крупное направление – ОПТОЭЛЕКТРОНИКУ. В оптоэлектронных устройствах на информатику совместно работают электроны и фотоны, причем действия

фотонов являются определяющими, так как именно ими обеспечивается то качественно новое, что отличает оптоэлектронику от традиционной электроники. Но, подчеркнем еще раз, оптоэлектронная устройства – это не комбинация двух устройств – электронного и оптического, это – его единство, целостность которого зиждется на взаимопревращениях электронов и фотонов. В отличие от электрона фотон – электрически нейтральная частица. Это его уникальное свойство. Высокая скорость передачи световых сигналов, бесконтактность оптических связей, возможность непосредственного визуального контроля информации на любой стадии ее обработки, а также ряд других достоинств способствовали бурному формированию нового направления технической кибернетики на базе систем обработки информации, содержащих, наряду с электронными, также фотонные звенья.

Три причины, как подчеркивал один из создателей этого направления академик Э.И. Адирович, определили жизнеспособность и интенсивное развитие этого процесса. Во-первых, стремление охватить все богатство информации, поступающей по оптическим каналам. Во-вторых, стремление сделать видимой любую информацию, а не только те события, которые сопровождаются испусканием, поглощением или отражением света. И, в-третьих, необходимость обрабатывать большие и все возрастающие массивы информации за короткие и все сокращающиеся промежутки времени.

Основной элемент оптоэлектроники – оптрон или оптопара: полупроводниковые источники и приёмники излучения, связанные либо электрически, либо оптически или тем и другим способом вместе.

Принцип действия оптронов любого вида основан на следующем. В источнике излучения электрический сигнал преобразуется в световой, и, после взаимодействия с объектом исследования, в фотоприемнике световой сигнал вызывает электрический отклик, несущий полезную информацию, пригодную для дальнейшей обработки.

Одним из важных элементов оптрона – приёмник оптического излучения (фотоприемник), обязательный, можно даже сказать – абсолютно необходимый, элемент в большинстве мало-мальски сложных оптоэлектронных систем. В настоящее время серийно выпускаются и вновь разрабатываются различные приемники оптического излучения: фоторезисторы, фотодиоды, фототранзисторы,

фототиристоры, приборы зарядовой связью, приемники на основе аномально высоких фотонапряжений (АФН-приемники), фотоэлементы.

Свет всегда играл важнейшую роль в жизни человека, являясь источником существования, средой обитания и средством познания окружающего мира. С незапамятных времен безотказно работает на человека свет Солнца и звезд, к ним сам человек добавил костры, свечи, керосиновые лампы, газовые рожки и электрические лампы. Но, разумеется, ни управление солнечными зайчиками, ни включение-выключение осветительных ламп, пусть даже самыми совершенными интегральными схемами, не имеет никакого отношения к оптоэлектронике. Здесь, как и повсюду в информатике, нужны миниатюрность, экономичность, быстрдействие, направленность воздействия, надежность. Лишь с появлением светоизлучающих диодов (светодиодов) и лазеров идеи оптоэлектроники обрели, наконец-то реальную основу для своего воплощения.

Огромный интерес, проявляемый к светоизлучающим и лазерным диодам специалистами в области оптоэлектроники, обусловлен их замечательными характеристиками: высокой эффективностью преобразования электрической энергии в световую, высоким быстродействием, малым потреблением энергии, надежностью, большим сроком службы, высокой устойчивостью к механическим, климатическим и электромагнитным воздействиям. Из всего многообразия лазеров наибольший интерес для оптоэлектроники представляют полупроводниковые инжекционные и миниатюрные газовые лазеры.

В тех случаях, когда требование когерентности и острой направленности излучения не выдвигается, используют светодиоды – излучатели, основанные на инжекционной спонтанной электролюминесценции полупроводниковых диодов.

Это многообразие связей источников и приёмников открывает большие функциональные возможности. Замена электронных связей фотонами способствует микроминиатюризации электронной аппаратуры различного назначения, созданию систем мониторинга, способных экстренно переработать огромное количество информации.

В настоящее время термин «оптоэлектроника» понимается шире – как общий синтез электроники и оптики. А совокупность принципов и разработок информационных устройств, содержащих электронные и фотонные звенья, правильнее всего называть ОПТРОНИКОЙ.

Удалось преодолеть большие, а порой и считался невозможным, технические трудности, обусловленные прямолинейностью

распространения света. Световой сигнал теперь можно передать по любому криволинейному пути. В 60-х годах прошлого столетия появилась новая отрасль оптики – ВОЛОКОННАЯ. Очень гибкие и тонкие стеклянные или кварцевые нити, выполняющие роль проводников света подобно тому, как металлические провода передают электрический ток, получили распространение в оптоэлектронной приборостроении для контроля труднодоступных мест, для ряда других применений. Их стали широко использовать в медицине в качестве эндоскопов, вводимых внутрь человеческого организма, их возможности всегда вызвали удивление и восхищение научной общественности и широкой публики.

В настоящее время в России, Узбекистане и за рубежом начались интенсивные разработки в области создания оптоэлектронных систем управления и контроля состояния и параметров конструкции, систем и агрегатов летательных аппаратов.

При этом, с позиций требований помехозащищенности, надежности, быстродействия, энергопотребления, миниатюризации размеров и минимизации веса очень важна замена электрических сигналов на оптические как в линиях связи на борту самолета, так и в бортовых и наземных устройствах преобразования информации. Причем в зарубежных оптоэлектронных системах уже используются оптические волокна с диаметром сердцевины от 30 до 600 мкм для измерения и контроля широкого спектра физических величин: давления, температуры, линейных и угловых ускорений, усилий и перемещений, напряженно-деформированного состояния элементов машиностроительных конструкций, строительных сооружений, механических систем и т.д.

В течение последних двадцати лет бурно развивались волоконно-оптические датчики различного назначения, быстрыми темпами разрабатывались оптоэлектронные системы на их основе, но освоение их потребителями было медленным. Однако, в последние годы в поисках путей расширения рынка сбыта и сфер применения своей продукции различные фирмы мира убедились в выгоде использования систем на основе волоконно-оптических датчиков.

Так, если в 1994 г. по оценкам японской Ассоциации развития оптоэлектронной промышленности и технологии общая сумма продаж волоконно-оптических датчиков составила 920 млн. долларов, то к 2010 году, по оценке специалистов Мэрленского университета (США), объемы продаж возрастут до 5 млрд. долларов.

Отличительной чертой оптоэлектроники как научно-технического направления является разнообразие используемых материалов для

элементов оптоэлектроники, причем в ближайшей перспективе сохранится тенденция дальнейшего расширения гаммы применяемых полупроводниковых структур.

Сегодня технология новых типов оптоэлектронных материалов еще не достигла уровня, требуемого для обеспечения высокоэффективного производства приборов с высокой степенью интеграции. Это же относится и к разработке специального технологического, испытательного и измерительного оборудования.

В тоже время на пути развития оптроники стоит много барьеров, так как на данный момент еще не представляется возможным столь же эффективно управлять фотонами, как электронами.

Но и это не все. Микроэлектроника готова перескочить через самое себя.

В недрах ее зародилось принципиально новое направление – нанотехнология. Швейцарские ученые, нобелевские лауреаты 1986 года Г.Рорер и Г.Биннинг создали сканирующий туннельный микроскоп, позволяющий изучать и модифицировать поверхность вещества на атомном уровне. Появилась удивительная возможность – вместо транзисторов создавать новые элементы, состоящие всего лишь из несколько атомов! Все революционные последствия развития нанотехнологии пока еще даже не осмысленны, но уже сообщается о практических результатах, буквально вызывающих шок. Так, например, с помощью сканирующего туннельного микроскопа внутри одного углубления современного оптического компакт-диска удалось разместить 10 000 углублений диаметром 10 нм и глубиной 0,5 нм.

К таким качественно новым оптоэлектронным изделиям можно отнести оптоэлектронные компьютеры с архитектурой, подобной человеческому мозгу, а также стереоскопические системы, имитирующие возможности и характеристики человеческого зрения с автоматическим распознаванием движущих объектов.

Ориентированность оптроники XXI века на системы получения, обработки, передачи, хранения, отображения и интерпретации больших массивов информации позволяет сделать вывод о том, что магистральный путь ее развития лежит в русле интегральной оптоэлектроники, частный случай которой отражает концепция фотонно-ориентированной микроэлектроники.

Принципиальные достоинства оптоэлектронных устройств и систем определяется следующими основными особенностями.

1. Частота электромагнитных колебаний в оптическом диапазоне (от 1 нм по 1 мм) много больше, чем в радиодиапазоне, а именно 10¹³-10¹⁵ Гц, что обуславливает высокую скорость

передачи информации и высокую информационную емкость оптического канала связи. Для передачи обычного телевизионного сигнала требуется полоса частот $\Delta\nu \geq 8$ МГц. В метровом диапазоне при значении несущей частоты $\nu_0 \leq 300$ МГц, можно передать около десятка ТВ программ. В оптическом диапазоне, притом же соотношении $\Delta\nu/\nu_0$ их число возрастает в миллион раз.

2. Оптическое излучение имеет компактный спектр в определенных длинах волн. Следствием этого является: высокая плотность записи информации в оптических ПЗУ (~108 бит/см²); высокая концентрация оптического излучения в пространстве, так как минимальный объем, в котором может быть сфокусировано электромагнитного излучение составляет $\sim \lambda^3$. По этой причине световоды могут быть на несколько порядков меньше волноводов СВЧ. Угловая расходимость луча $\square \lambda$, для оптического диапазона нетрудно сформировать узкую диаграмму направленности с угловым расхождением $< 1'$. И если в СВЧ ($\lambda = 1$ м) для этого необходима антенна диаметром – 100 м, то в оптическом – сферическое зеркало или линза меньших размеров.

3. Возможность двойной – временной и пространственной модуляции светового луча, что позволяет проводить параллельную обработку информации и получать объемное голографическое изображение.

4. Передача информации осуществляется фотонами – электрически нейтральными частицами, вследствие чего реализуется: а) Идеальная гальваническая развязка входа и выхода; б) Однонаправленность потока информации и отсутствие обратной связи; в) Невосприимчивость оптических каналов к воздействию электромагнитных полей, т.е. помехозащищенность, исключение наводок и паразитных связей; г) Многоканальность связи; д) Малое затухание сигналов.

5. Возможность непосредственного оперирования со зрительно воспринимаемыми образами, восприятия на входе и визуализации на выходе.



Приемник оптического излучения



Светодиоды

Логика развития и взаимного обогащения оптики и электроники приводит нас к мысли, что синтез этих наук – оптоэлектроника – станет базой и генеральным направлением информационной техники будущего.

Причина этого очевидна: оптоэлектроника

оперирует светом, это и «обрабатываемый материал», и «средство обработки», и ее конечный итог одновременно. А где свет – там тепло, счастье, любовь, жизнь... Светом пронизаны стихи Гомера и Навои, Пушкина и Шиллера, музыка Моцарта и Баха, Чайковского и Шостаковича, картины Рериха и Шишкина, Пикассо и Дали.

Да будет свет!



Нематжон Рахимович Рахимов - Доктор технических наук, профессор СГГА. Область научных интересов: оптические приборы, оптоэлектроника, электроника, оптические датчики и приборы.

Математическая модель распространения света в пространстве

В.И. Гужов, П.А. Бердников, Р.А. Кузнецов
Новосибирский Государственный Технический Университет

Аннотация: В статье рассматривается математическая модель распространения света в пространстве и структура оптических систем восстановления изображений⁸.

Ключевые слова: свет, теория поля, математическая модель.

В классической оптике изображение формируется с помощью оптических устройств, состоящих из набора линз и зеркал, а регистрируются с помощью датчиков реагирующих на интенсивность оптического излучения. В радиоастрономии для регистрации изображений требуются специальные антенны и чувствительные квантовые приёмники. Акустические поля могут регистрироваться с помощью матрицы микрофонов. В общем случае изображения формируются на основе физических принципов преобразования волновых полей.

Свет - это электромагнитное излучение в определенном диапазоне электромагнитных волн. Все электромагнитные волны принято делить на радиоволны, инфракрасное, видимое, ультрафиолетовое, рентгеновское и гамма-излучения (рис. 1) [ссылка].

Между ними нет резких переходов, сами участки перекрываются, а границы между ними условны. Различные участки электромагнитного спектра отличаются друг от друга длиной волны λ и частотой ν :

$$c = \lambda \nu, \nu = \frac{1}{T}, T = \frac{2\pi}{\omega}, c = \frac{\omega \lambda}{2\pi}.$$

Видимое, инфракрасное и ультрафиолетовое излучения составляют так называемую оптическую область спектра. Выделение такой области обусловлено не только близостью соответствующих участков спектра, но и сходством методов и приборов, применяющихся для ее исследования (линзы и зеркала для фокусировки излучения, призмы, дифракционные решетки, интерференционные приборы для исследования спектрального состава излучения и пр.). Оптический спектр занимает диапазон от условной границы

инфракрасного излучения до условной коротковолновой границы ультрафиолета ($\lambda = 10$ нм, $\nu = 3 \cdot 10^{11}$ Гц).

- инфракрасное излучение $\lambda \sim 2$ мм - 760 нм ($\nu = 1,5 \cdot 10^{11} - 4 \cdot 10^{14}$ Гц)
- видимое излучение занимает $\lambda \sim 760 - 400$ нм, ($\nu \sim 4 \cdot 10^{14} - 7,6 \cdot 10^{14}$ Гц)
- ультрафиолет $\lambda \sim 400 - 10$ нм, ($\nu \sim 7,6 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$ Гц)

Фотоны, с точки зрения квантовой теории представляют собой волновой пакет, локализованный в пространстве и времени. Фотоны имеют длительность всего 0.1 пикосекунды. (1 пс = 10^{-12} сек).

Энергия светового кванта определяется выражением [1]

$$\varepsilon = h \cdot \nu, (1)$$

где $h = 6,63 \cdot 10^{-27}$ эрг $c = 4 \cdot 10^{-15}$ эВ \cdot с = $6 \cdot 10^{-34}$ Дж \cdot с — постоянная Планка, фундаментальная величина.

Энергию квантов в физике принято выражать в электрон-вольтах. Это внесистемная единица измерения энергии. Один электрон-вольт (1 эВ) равен энергии, которую приобретает электрон, когда разгоняется электрическим полем напряжением 1 В. Это очень небольшая величина, в единицах системы Си 1 эВ = $6 \cdot 10^{-18}$ Дж. Но в масштабах атомов и молекул электрон-вольт — вполне солидная величина.

Для длины волны $\lambda = 1000$ нм энергия соответствующего кванта составляет $\varepsilon = 1,23$ эВ, или приблизительно один электрон-вольт (эВ). На концах видимого спектра для энергии кванта формула (1) дает $\varepsilon \sim 1,6$ эВ, $e \sim 3$ эВ.

В области радиоволн квантовые свойства излучения практически не сказываются, поскольку энергия квантов в этой области очень мала.

В оптической области спектра частоты ν уже перестают быть малыми по сравнению с собственными частотами атомов. Благодаря этому в этой области наряду с волновыми, проявляются и квантовые свойства света.

В области рентгеновского и гамма-излучения на первый план выступают уже квантовые свойства излучения. Энергия рентгеновских квантов лежит в пределах 20 эВ - 1 МэВ ($\lambda \sim 50 - 10^{-3}$ нм), а энергия гамма-квантов - больше 0,1 МэВ ($\lambda < 10^{-2}$ нм).

⁸ Работа выполнена по заданию Министерства образования и науки РФ, проект №7.599.2011, Темплан, НИР № 01201255056.

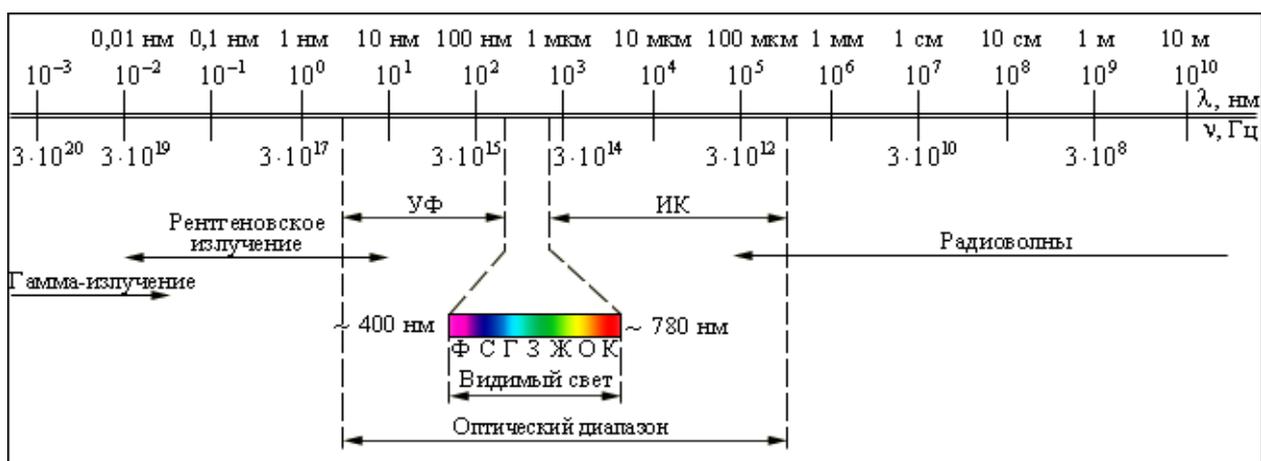


Рис. 1. Шкала электромагнитных волн

Волновые и квантовые явления являются общими для всего спектра электромагнитного излучения. Оптические методы исследований являются наиболее тонкими и точными. Поэтому оптике принадлежит ведущая роль во многих фундаментальных исследованиях.

Характеристики электромагнитных полей исчерпывающим образом описывают уравнения Максвелла.

Уравнения Максвелла представляют собой однородные дифференциальные уравнения первого порядка. Они получены феноменологическим обобщением опытных фактов, известных к середине XIX века. Записав свои уравнения, Максвелл предсказал существование электромагнитных волн, которые только через 25 лет были обнаружены Герцем.

Уравнения Максвелла в первоначальном виде состояли из системы 20 уравнений с 12 переменными [2]. В 1880 году Хевисайд переписал результаты Максвелла в терминах векторного анализа. В настоящее время они записываются в виде восьми (два векторных с тремя компонентами каждое и два скалярных) линейных дифференциальных уравнений в частных производных 1-го порядка для 12 компонент четырёх векторных функций (D - электрическая индукция, E - напряженность электрического поля, H - напряженность магнитного поля, B - магнитная индукция).

Распространение электромагнитных волн в веществе в тех случаях, когда длина волны велика по сравнению с межатомными расстояниями, можно рассматривать феноменологически, то есть без учета атомистического строения среды. Для этого уравнения Максвелла дополняются

материальными уравнениями, в которых свойства среды учитываются введением соответствующих параметров.

Распространение электромагнитных волн со скоростью света первоначально интерпретировалось как возмущения некоторой среды, так называемого эфира. Были предприняты многочисленные попытки обнаружить движение Земли относительно эфира, однако они неизменно давали отрицательный результат. Поэтому Анри Пуанкаре высказал гипотезу о принципиальной невозможности обнаружить подобное движение (принцип относительности). Ему же принадлежит постулат о независимости скорости света от скорости его источника. Эти две гипотезы легли в основу статьи Альберта Эйнштейна, в которой излагались эти результаты [3].

Уравнения Максвелла не выводятся, они получены обобщением опытных фактов, и не стоит ожидать, что они угаданы в окончательной форме. Уравнения Максвелла, как говорил Герц, живут самостоятельной жизнью и иногда кажутся даже умнее человека, создавшего их.

Практически любое физическое явление можно описать в виде дифференциальных уравнений, но, к сожалению, получить их аналитическое решение можно только для ограниченного класса уравнений. Поскольку свет – это электромагнитная волна, то можно попробовать получить аналитические решения дифференциальных уравнений Максвелла при некоторых граничных условиях.

Рассмотрим математическую модель преобразования волновых полей в оптических системах. Ниже показана типичная система образования оптических изображений (рис. 2).

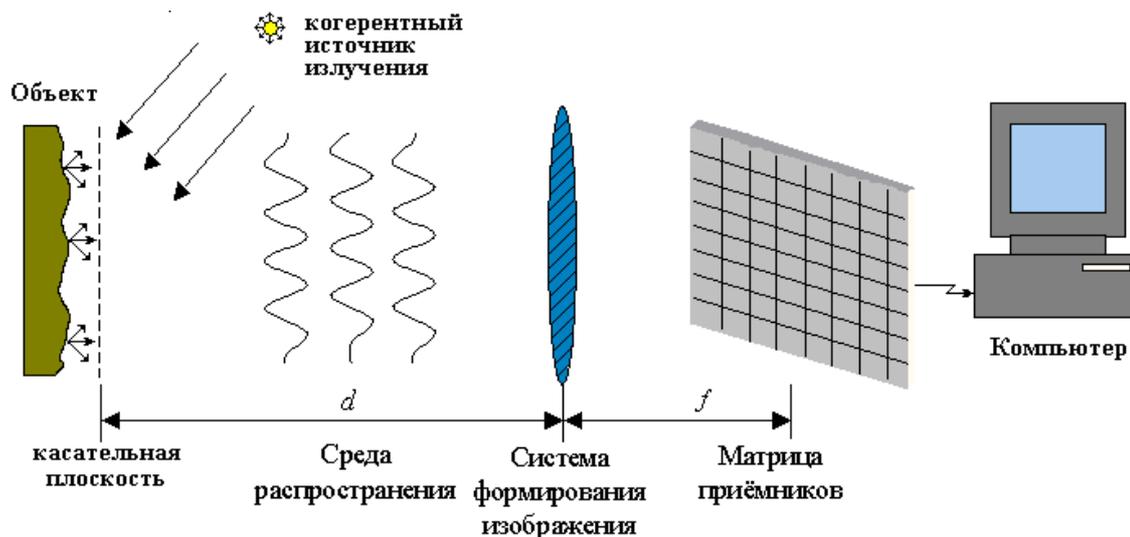


Рис. 2. Типичная система образования оптических изображений

Чтобы не усложнять задачу, ограничимся несамосветящимися прозрачными объектами и монохроматическим освещением [4].

Свойства объекта, определяющие его способность отражать и рассеивать падающее на него излучение, описываются коэффициентом отражения излучения по интенсивности $B(x, y, z)$ или комплексной амплитудой $\bar{b}(x, y, z)$ – функциями координат на поверхности объекта. Коэффициент отражения по амплитуде является комплексной функцией, которая может быть представлена в виде:

$$\bar{b}(x, y, z) = |b(x, y, z)| \exp[i\beta(x, y, z)]. \quad (2)$$

Её модуль $|b(x, y, z)|$ и фаза $\beta(x, y, z)$ показывают, во сколько раз изменяется амплитуда и соответственно насколько изменяется фаза излучения в точке

$$\Gamma(\xi, \eta, \zeta) = \int_{F(x, y, z)} A(x, y, z) |b(x, y, z)| \exp[i\alpha(x, y, z) + i\beta(x, y, z)] \times \dots \times T(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) dx dy dz, \quad (4)$$

где интегрирование производится на поверхности объекта $F(x, y, z)$. Вид ядра этого преобразования $T(x, y, z, \xi, \eta, \zeta)$ зависит от

$$b(x, y, z) = \int_S \Gamma(\xi, \eta, \zeta) \bar{T}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta) d\xi d\eta d\zeta, \quad (5)$$

где $\bar{T}(x, y, z, \xi, \eta, \zeta)$ – это оператор, взаимный T , а интегрирование происходит по поверхности наблюдения S .

Функцию $\Gamma(\xi, \eta, \zeta)$ можно назвать математической голограммой. Задача синтеза голограмм заключается в вычислении функции $\Gamma(\xi, \eta, \zeta)$ по заданной функции $\bar{b}(x, y, z)$ и регистрации в форме, которая бы допускала

(x, y, z) поверхности объекта после отражения. $B(x, y, z)$ определяется как

$$B = |b|^2 = bb^*, \quad (3)$$

где * знак комплексного сопряжения.

Зная функцию $\bar{b}(x, y, z)$, уравнение поверхности тела $F(x, y, z) = 0$ и распределение амплитуды и фазы падающего на объект света, можно в принципе вычислить распределение амплитуды и фазы рассеянного света в произвольной точке пространства.

Пусть $A(x, y, z) \exp[i\alpha(x, y, z)]$ – распределение амплитуды и фазы освещения на поверхности объекта. Тогда поле на некоторой поверхности наблюдения можно описать с помощью интегрального соотношения Кирхгофа [5].

пространственного расположения объекта и поверхности наблюдения. Это преобразование в принципе обратимо

взаимодействие с излучением для визуализации и восстановления $\bar{b}(x, y, z)$.

Вычисление интеграла (4) в общем случае представляет довольно сложную задачу. Её удастся решить только для очень простых объектов, заданных небольшим количеством отдельных линий или точек. В общем случае приходится прибегать к различного рода

упрощениям.

Первое упрощение, к которому можно прибегнуть, состоит в сведении трёхмерной задачи к двумерной.

Для этого поверхность наблюдения считается плоской, а распределение амплитуды и фазы волны на поверхности объекта заменяется по законам геометрической оптики распределением амплитуды и фазы на плоскости, касающейся объекта или достаточно близкой к нему (чтобы при пересчёте амплитуды и фазы пренебрегать дифракцией и пользоваться геометрической оптикой) и параллельной плоскости наблюдения (рис. 3).

Объект



касательная плоскость

Рис. 3. Объект и касательная плоскость

В этом случае (4) запишется в виде

$$\Gamma(\xi, \eta) \sim \int_{x,y} b_1(x, y) T_d(x, y, \xi, \eta) dx dy, \quad (6)$$

где $b_1(x, y)$ – комплексная функция, полученная в результате пересчёта амплитуды и

$$T_d(x, y, \xi, \eta) = \frac{\exp[i2\pi\lambda^{-1}\sqrt{(x-\xi)^2 + (x-\eta)^2 + d^2}]}{\sqrt{(x-\xi)^2 + (x-\eta)^2 + d^2}}, \quad (7)$$

где λ – длина волны излучения.

Второе упрощение. Если геометрические параметры тела малы по сравнению с расстоянием d до плоскости наблюдения, то это вместе с условием малости площади наблюдения приводит к дальнейшему упрощению. При

$$T_d(x, y, \xi, \eta) \approx \frac{\exp(i2\pi\lambda^{-1}d) \exp\{i\pi(\lambda d)^{-1}[(x-\xi)^2 + (x-\eta)^2]\}}{d}, \quad (9)$$

В этом случае (6) переходит в интеграл Френеля:

$$\Gamma(\xi, \eta) \sim \int_{x,y} b_1(x, y) \exp\{i\pi(\lambda d)^{-1}[(x-\xi)^2 + (x-\eta)^2]\} dx dy \quad (10)$$

фазы поля, отражённого объектом на плоскость (x, y) , касательную к нему и параллельную плоскости наблюдения, d – расстояние между этими двумя плоскостями (рис. 4).

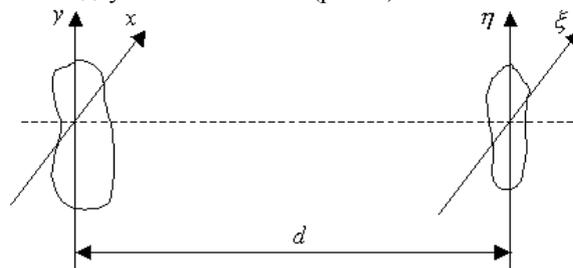


Рис. 4. Плоскости пересечения

Очевидно, если угол, под которым виден объект с поверхности наблюдения (угол охвата) и площадь наблюдения малы, это естественная аппроксимация. Для задач, где угол охвата должен быть велик, такой подход означает необходимость сведения их к задаче расчёта при малом угле охвата. При этом для реализации больших углов охвата поверхность наблюдения можно разбить на небольшие фрагменты, аппроксимируемые плоскостями, и рассматривать голограммы для отдельных фрагментов, каждая из которых представляет часть общего угла и воспроизводит объект под своим ракурсом.

Ядро преобразования (6), связывающее распределение света на двух параллельных плоскостях, имеет вид

$$\frac{[(x-\xi)^2 + (x-\eta)^2]_{\max}}{d^2} = \theta_{\max}^2 < \sqrt{\frac{4\lambda}{kd}}, \quad (8)$$

где θ_{\max} – максимальный угол (в радианах), под которым наблюдается объект с расстояния d ; k – коэффициент допустимой фазовой ошибки, равной π/k , в передаче аргумента экспоненты в (7). Тогда

Преобразование, описываемое этим соотношением, называется *преобразованием Френеля*.

Если

$$\pi(x^2 + y^2) / \lambda d \ll 1 \text{ и}$$

$$\Gamma(\xi, \eta) \sim \int_{x,y} b_1(x, y) \exp(i2\pi(\lambda d)^{-1}(x\xi + y\eta)) dx dy \quad (12)$$

Это преобразование соответствует дальней зоне дифракции (дифракции Фраунгофера).

Преобразование Френеля в вычислительном

$\pi(\xi^2 + \eta^2) / \lambda d \ll 1$, (11) то этими составляющими в (10) можно пренебречь. В этом случае интеграл Френеля (10) переходит в *интеграл Фурье*:

отношении удобнее выразить через интегральное преобразование Фурье

$$\Gamma(\xi, \eta) = e^{\frac{i\pi}{\lambda d}(\xi^2 + \eta^2)} \int_{x,y} b_1(x, y) e^{\frac{i\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)} e^{-\frac{i2\pi}{\lambda d}(x\xi + y\eta)} dx dy \quad (13)$$

Преобразование Фраунгофера представляет собой с точностью до множителей пространственный Фурье-спектр функции $b_1(x, y)$:

$$\mathcal{F}_b(v_x, v_y) = \iint_{x,y} b_1(x, y) e^{i\pi(v_x x + v_y y)} dx dy, \quad (14)$$

$$\Gamma(\xi, \eta) \sim \mathcal{F}_b(v_x, v_y), \quad (15)$$

где частоты $v_x = \frac{\xi}{\lambda d}$ и $v_y = \frac{\eta}{\lambda d}$.

Таким образом, при прохождении оптического волнового фронта через свободное пространство на некотором расстоянии происходит преобразование Френеля, которое при увеличении расстояния, переходит в преобразование Фурье (рис. 5).

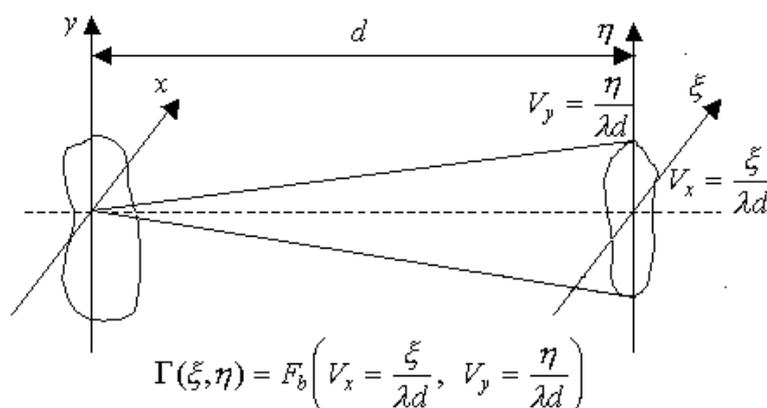


Рис. 5. Пространственные частоты

Для получения комплексной амплитуды исходного волнового фронта необходимо сделать обратное преобразование. Такое преобразование может осуществлять тонкая линза.

Для получения комплексной амплитуды исходного волнового фронта необходимо сделать обратное преобразование. Такое преобразование может осуществлять тонкая линза.

Рассмотрим простейшую оптическую схему (рис.6). На линзу падает распространяющаяся в направлении z плоская волна с комплексной амплитудой непосредственно вблизи линзы a_1 .

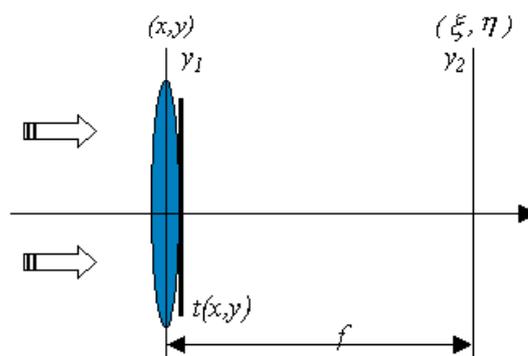


Рис. 6. Обратное преобразование Фурье, осуществляемое тонкой линзой

Комплексная амплитуда в плоскости y_2 будет иметь вид, похожий на соотношение (12):

$$a(\xi, \eta) = \frac{ia_1}{\lambda f} e^{-\frac{i\pi}{\lambda f}(\xi^2 + \eta^2)} \cdot \iint t(x, y) e^{\frac{i2\pi}{\lambda f}(x\xi - y\eta)} dx dy \quad (16)$$

Если на тонкую линзу с примыкающим к ней транспарантом падает плоская волна, то в задней фокальной плоскости линзы образуется распределение комплексных амплитуд, пропорциональное произведению фазового множителя сферической волны и Фурье-образа пропускания транспаранта.

Таким образом, при распространении волнового поля, отраженного от диффузного объекта, на некотором расстоянии d происходит преобразование Френеля комплексной амплитуды, которое с увеличением расстояния переходит в преобразование Фурье.

Для получения комплексной амплитуды исходного волнового фронта необходимо сделать обратное преобразование. Для этого в плоскости необходимо поместить линзу. В плоскости с точностью до постоянных множителей распределение интенсивности совпадает с распределением на плоскости объекта (рис. 7).

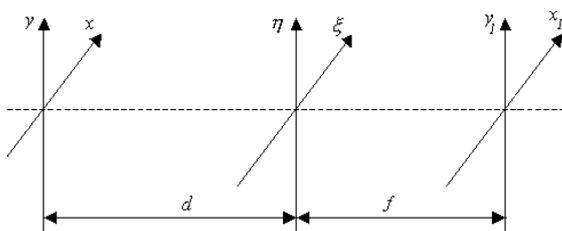


Рис. 7. Получение комплексной амплитуды исходного волнового фронта

Фотоприемники регистрируют интенсив-

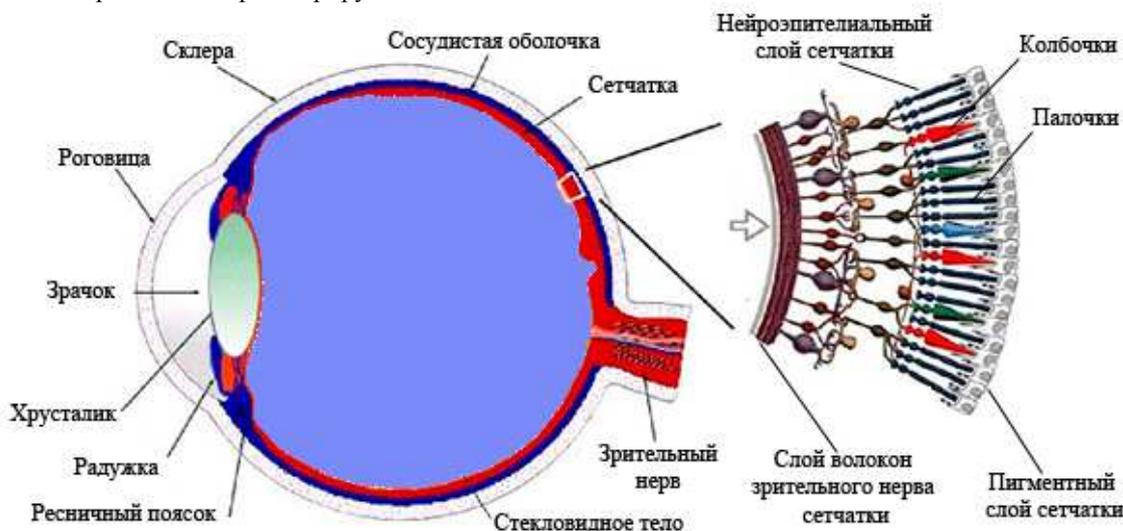


Рис. 8. Строение человеческого глаза

Таким образом, глаз выполняет функцию оптического процессора, выполняющего обратное преобразование Фурье.

ность:

$$I(x, y) = \langle a(\xi, \eta) a(\xi, \eta)^* \rangle. \quad (17)$$

При этом фазовый множитель сокращается, поскольку $(e^k)^* = e^{-k}$, $e^k e^{-k} = 1$.

В качестве примера оптической системы можно рассмотреть глаз человека (рис. 8).

Свет, отраженный от объекта поступает на зрачок. Поскольку при прохождении определенных расстояний с ним происходит преобразование Френеля или Фурье, необходимо сделать обратное преобразование. Для этого служит хрусталик, который выполняет функцию линзы и может менять свое фокусное расстояние в зависимости от расстояния от объекта. Сетчатка реагирует на давление света (интенсивность). Сетчатка состоит из специальных фоторецепторов, колбочек и палочек, содержащих зрительные пигменты.

Свет поглощается светочувствительной молекулой (пигмент - родомин или родопсин). Таких молекул в одной зрительной клетке 10^9 (миллиард). Молекула работает как фотоумножитель. Квант света запускает каскад ферментативных реакций. Они приводят к быстрому, эффективному размножению и усилению почти в миллион раз первичного светового сигнала. Эта фотохимическая реакция происходит за очень короткое время - менее чем за 200 фемтосекунд (фемтосекунда - 10^{-15} секунды).

Однако сетчатка глаза — это не просто набор фоточувствительных элементов. Сетчатка занимается ещё и оцифровкой, кодированием,

сжатием, переводом в нервные импульсы. По зрительному нерву эти импульсы поступают в мозг для дальнейшей обработки.

Недавно удалось «расшифровать» код, который передают здоровые клетки сетчатки мышей. Сообщается также об успешной «дешифровке» и сигналов для обезьян, уже довольно близких к сигналам человека [6].

ЛИТЕРАТУРА

[1] Детлаф А.А., Яворский Б. М. Курс физики. — 5-е изд. — М.: АCADEMA, 2005. — С. 485. — 720 с.

[2] Максвелл Дж.К. Трактат об электричестве и магнетизме. В двух томах / — М.: Наука, 1989. (Классики науки).

[3] А. Einstein "Zur Elektrodynamik bewegter Korper" ("К электродинамике движущихся тел"). 1905. с. 891-922. Т. 17. см. А. Эйнштейн. Сочинения в 4 т. Т.1.

[4] Ярославский Л., Мерзляков Н.С. Цифровая голография.-1982.-М.:Наука.-220 с.

[5] Борн М., Вольф Э. Основы оптики.- М.:Наука.- 1973.- 719с.

[6] Пресс-релиз Weill Cornell Medical College.- http://weill.cornell.edu/news/releases/wcmc/wcmc_2012/08_13_12.shtml



Владимир Иванович Гужов
— декан факультета
Автоматики и
вычислительной техники в
Новосибирском
государственном техническом
университете, профессор,
доктор технических наук.
Является автором более 120
научных работ, в том числе
является обладателем 4
патентов.

Область научных интересов:
программные системы,
высокоточные измерения.



Email: vig@edu.nstu.ru

**Кузнецов Роман
Александрович** - аспирант
Новосибирского
государственного
технического университета.

Область научных интересов:
лазерные измерительные
системы, обработка
изображений.

Email:

romanalexkuznetsov@gmail.com



**Бердников Петр
Анатольевич** – аспирант
Новосибирского
государственного
технического университета.

Область научных интересов:
лазерные измерительные
системы, об работка
изображений.

Email: kiwonder@mail.ru

**VI. Дискуссии. Форум.
К сведению авторов.**

Содержание раздела:

- Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия» С. 131–132.

Требования к публикациям в научном электронном журнале «Автоматика и программная инженерия»

ТЕМАТИКА ЖУРНАЛА

Автоматика, робототехника, автоматизированные системы, программные системы и средства (программная инженерия), защита информации, сетевые технологии, Национальная программная платформа (НПП), облачные технологии, инновации, информационные технологии, моделирование систем, свободное и открытое программное обеспечение.

ЦЕЛЕВАЯ АУДИТОРИЯ ЖУРНАЛА

Научные, педагогические и инженерные кадры, аспиранты, докторанты и студенты, представители бизнеса в области информационных технологий и автоматике.

ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

К опубликованию принимаются оригинальные научные статьи, ранее не опубликованные ни в каких средствах информации, включая научные и иные журналы и электронные сайты.

Не допускается дословное цитирование без кавычек из чужих источников (плагиат) и из своих источников (автоплагиат), допускается опубликование ранее опубликованных иллюстраций и уравнений, если это требуется для понимания текста. Иллюстрации из чужих источников должны быть снабжены ссылками на эти источники.

Статья должна содержать новые научные результаты и соответствовать тематике журнала.

Иллюстрации – черно-белые или цветные (предпочтительно).

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. Информация об авторах – в конце статьи, желательна фотография, электронная почта. Перечень авторов – на первой странице (только фамилии, И.О. и место работы).

Статья обязательно должна содержать аннотацию и ключевые слова, литературные ссылки, необходимые для понимания статьи и/или с указанием источников цитирования.

Присланные статьи подвергаются внутреннему анонимному рецензированию. Редакционная коллегия вправе отклонить

статью от опубликования с указанием причин этого отклонения или предложить доработать статью по замечаниям рецензента.

Ответственность за отсутствие плагиата, за научное содержание статей и за качество перевода на английский язык лежит на авторе (авторах) публикации.

Российские авторы должны присылать перед окончательным опубликованием статьи скан-файл **экспертного заключения** о возможности **открытого опубликования** статьи в ее окончательном виде. Бумажный вариант досылается позже.

Все вопросы по опубликованию можно уточнить по электронной почте.

Статьи, написанные в соавторстве действительных членов РАН или РАЕН, а также статьи, сопровождающиеся положительной рецензией действительных членов РАН или РАЕН (твердая копия с оригинальной подписью, заверенной по месту работы, пересылается по почте), могут быть опубликованы по ускоренной процедуре рецензирования. При этом не исключается предложение редакции о редакторской правке и/или о лучшем качестве иллюстративного материала.

ЯЗЫК ПУБЛИКАЦИИ

Научный журнал Автоматика и программная инженерия (АиПИ) издается на двух языках: русском и английском. Английская версия журнала выходит позже. Авторам предлагается присылать на адрес заместителя главного редактора 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 подрисуночных 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, подрисуночных подписей, оформления библиографических ссылок и т. д.

Пожалуйста, используйте курсив для латиницы в русскоязычных статьях, для сокращенных наименований физических величин после их численного значения, а также для полных или сокращенных слов «таблица», «рисунок», «приложение», «теорема», «лемма», «пример» и так далее, если после этих слов применена нумерация.

Например, «... как показано на этом рисунке», но «На *рис. 2* показано».

Для чисел использовать курсив не следует, кроме случаев, когда числами обозначаются блоки или элементы на рисунке.

Например: $F_2 = 33,5 \text{ Н}$.

Не следует использовать наименования физических величин в сокращенном виде в

разрыве (вследствие переноса на другую строку) от их численного значения. Чтобы этого избежать, применяйте символ «неразрывный пробел». Также не применяйте эти сокращенные наименования, а также знаки математических операций при отсутствии численного значения.

Например, некорректным по этому признаку является фраза: «Сила тока = 3 А», или «Сила тока составляет несколько А». Следует применять корректную запись, например: «Сила тока $I = 3 \text{ А}$ » или «Сила тока составляет несколько Ампер».

Статьи, оформленные с существенными нарушениями требований к оформлению, могут быть отклонены от опубликования на этом основании.

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).