# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

МАЙ-ИЮНЬ 2011 ВЫПУСК 3 (73) ISSN 1819-222X



**ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Оптико-электронный комплекс повышенной производительности — *Демин А.В., Денисов А.В., Перл И.А., Третьякова А.А.* — 1

Исследование возможности применения спектрозонального метода для ослабления влияния воздушного тракта в оптико-электронных системах контроля положения — *Лашманов О.Ю., Пантюшин А.В., Тимофеев А.Н., Ярышев С.Н.* — 5

Коррекция спектральной чувствительности УФ радиометра спектрофотометрическим методом — *Антонов В.В., Ишанин Г.Г.* — 9

Оптико-электронная обработка информации в пневмооптическом тонометре — *Кузнецов К.Ю., Нагибин Ю.Т., Трофимов В.А., Алексеев С.А.* — 14

**ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА**

Релей-тейлоровская неустойчивость запыленного газа — *Савельев Р.С., Розанов Н.Н., Сочилин Г.Б., Чивилихин С.А.* — 18

Низкотемпературные измерения ап-конверсионной люминесценции в наноструктурированных активированных стеклокерамиках — *Асеев В.А., Колобкова Е.В., Некрасова Я.А.* — 22

Нелинейно-оптический отклик калиево-алюмоборатных стекол с нанокристаллами галогенидов меди — *Ким А.А., Никоноров Н.В., Сидоров А.И. Цехомский В.А.* — 26

Кинетика химического травления фото-термо-рефрактивного стекла и наностеклокерамики на его основе — *Игнатьев А.И., Никоноров Н.В., Сорокина М.Г.* — 29

Оптимизация разбиения изображения в форме квадродерева по критерию минимальной длины описания во фрактальном сжатии — *Окунев В.В., Потапов А.С.* — 34

Анализ методов выделения движущихся объектов на видеопоследовательностях с шумами — *Козлов В.А., Потапов А.С.* — 39

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ**

Экспоненциальная устойчивость непрерывных динамических систем — *Быстров С.В., Григорьев В.В., Рабыш Е.Ю., Черевко Н.А.* — 44

Управление скоростью и моментом вентильного двигателя в приводе транспортного средства — *Громышева А.Д., Овчинников И.Е. Егоров А.В.* — 47

Сенсоры нестационарной теплометрии и их математические модели — *Пилипенко Н.В.* — 53

**МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА**

Динамика шпиндельных гидростатических подшипников при использовании диафрагменных регуляторов — *Прокопенко В.А., Чернов И.А.* — 57

Управление вращательным движением космического аппарата при переменном распределении массы — *Королев В.С., Кравчук Р.Ю.* — 62

Алгоритм оценивания рациональности построения низкоорбитной системы искусственных спутников мониторинга наземных объектов — *Пикуль А.И. , Хегай Д.К. , Шпак А.В.* — 66

**ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

Системная интеграция при моделировании и изготовлении изделий в среде расширенного предприятия — *Грибовский А.А.* — 71

Использование процедур выбора для построения очередей ремонта оборудования — *Шкурина Г.Л.* — 74

Анализ результатов контроля технических изделий методом акустической эмиссии — *Лузина Н.П.* — 78

**КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ**

Визуализация динамики морских объектов в широкоэкранных системах виртуальной реальности — *Безгодов А.А., Загарских А.С., Бухановский А.В.* — 84

Пространственные алгоритмы кодирования изображений — *Колесников Е. И., Костикова Е.В.* — 88

Исследование вариантов реализации этапа предсказания лифтинговой схемы при решении задачи сжатия звука — *Пиуновский Е.В.* — 92

Моделирование работы псевдо-сетевой версии базы данных в MS ACCESS на примере отдела продаж малого предприятия — *Макаров С.П., Бороненко Т.А., Коробейников А.Г.* — 96

Задачи обеспечения качества передачи информации в DTN сетях — *Крылов Б.А., Курников А.Е.* — 102

Метод проектирования трехмерного печатного узла — *Кузнецова О.В., Романова Е.Б.* — 105

**МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ**

Минимизация рисков потери доступности программного обеспечения после установки обновлений или изменения функциональности — *Арустамов С.А., Генин М.Г.* — 111

Основные положения концепции обеспечения безопасности объектов — *Волхонский В.В.* — 116

**НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ**

Автоматизированная система для физико-математической школы — *Варенников Д.А., Лукьянова Г.В.* — 122

Разработка стенда для экспериментальных исследований типовых схем развертывания системы ACADEMICNT — *Скшидлевский А.А., Лямин А.В.* — 126

**ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ**

Особенности экономического поведения участников арт-рынка — *Васюхин О.В., Тарарухина О.В.* — 130

Современные проблемы развития мирового рынка объектов интеллектуальной собственности — *Даюб А.В., Куркина Н.С.* — 133

**КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ** — 138

**SUMMARY** — 146

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

**ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР**.....
д.т.н., профессор В.О. Никифоров

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ** .....
д.т.н., профессор А.А. Бобцов, д.т.н. А.В. Бухановский,
д.т.н., профессор В.А. Валетов, д.ф.-м.н., ст.н.с. Т.А. Вартанян,
д.т.н. М.А. Ган, д.т.н., профессор Ю.А. Гатчин,
к.т.н., ст.н.с. Н.Ф. Гусарова, д.т.н., профессор А.В. Демин,
к.т.н., доцент Н.С. Кармановский (заместитель главного редактора),
д.ф.-м.н., профессор Ю.Л. Колесников, д.ф.-м.н., профессор С.А. Козлов,
д.т.н., профессор А.Г. Коробейников, д.т.н., профессор В.В. Курейчик,
д.т.н., доцент Л.С. Лисицына, к.т.н., доцент В.Г. Мельников,
д.т.н., профессор Ю.И. Нечаев, д.т.н., профессор Н.В. Никоноров,
д.т.н., профессор А.А. Ожиганов, д.т.н., профессор П.П. Парамонов,
д.ф.-м.н., ст.н.с. Е.Ю. Перлин, д.т.н., профессор И.Г. Сидоркина,
д.т.н. О.А. Степанов, д.т.н., профессор В.Л. Ткалич,
д.т.н., профессор А.А. Шалыто, д.т.н., профессор Ю.Г. Якушенков

Секретарь Г.О. Артемова
Редактор Н.Ф. Гусарова
Перевод Н.Г. Лещикова

Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, СПбГУ ИТМО, комн. 330

Телефон / факс (812) 233 45 51
http: //books.ifmo.ru/ntv/
E-mail:karmanov@mail.ifmo.ru

# 1 ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ СИСТЕМЫ. ОПТИЧЕСКИЕ ТЕХНОЛОГИИ

**УДК 528.8 (15)**

## ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЙ КОМПЛЕКС ПОВЫШЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

**А.В. Демин, А.В. Денисов, И.А. Перл, А.А. Третьякова**

Описан оптико-электронный комплекс дистанционного зондирования Земли с повышенной производительностью и эффективностью процесса дистанционного зондирования Земли.
**Ключевые слова:** оптико-электронный комплекс, дистанционное зондирование Земли, ФПЗС-линейка.

### Введение

Исследования в интересах народного хозяйства и обороноспособности государства обеспечиваются оптико-электронными комплексами дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса ($ОЭК_{ДЗЗ}$), наряду с известными методами и средствами повышения эффективности управления научно-техническими и технологическими процессами, связанными с разнообразными направлениями. Находящиеся сегодня в эксплуатации коммерческие спутники первого поколения (Ikonos, Quick Bird и др.), оснащенные $ОЭК_{ДЗЗ}$, обеспечивают съемку поверхности Земли с пространственным разрешением не более 1 м и с точностью геопривязки изображений около 15–25 м без наземных контрольных точек [1]. На 53-м Международном конгрессе по астронавтике (Хьюстон, США, 2002 г.) Европейская промышленная корпорация представила космический аппарат (КА) с $ОЭК_{ДЗЗ}$ массой 980 кг (рис. 1), который обеспечивает на солнечно-синхронной орбите с высоты 695 км пространственное разрешение в надире 0,7 м с полосой захвата в 20 км в панхроматическом режиме съемки поверхности Земли и 2,8 м – в мультиспектральном (голубой, зеленый, красный и около ИК), производительность 30000 км$^2$ за виток (летний сезон и снимки без облаков) и 3,5 Гб/с.

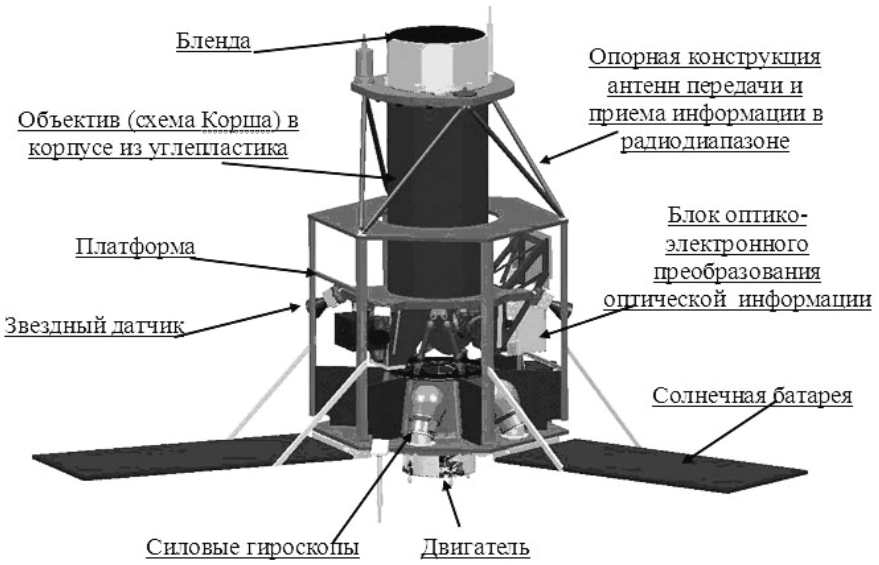



Рис. 1. Космический аппарат с $ОЭК_{ДЗЗ}$ (Европейская промышленная корпорация)

На рис. 2 представлена обобщенная структурная схема оптико-электронного преобразователя (ОЭП). Объектив $ОЭК_{ДЗЗ}$ формирует изображение поверхности Земли на фотозоне, в поле которой расположены приемники. ОЭП состоит из множества чувствительных элементов – пикселей фотоприемника на основе прибора с зарядовой связью (ФПЗС) и представляет собой в зависимости от конструктивного его исполнения либо аналог растр-линейки, либо аналог растр-матрицы. Тем самым изображение после системы приема сигналов с пикселей фотозоны становится при соответствующей нормировке их цифровым образом, который потом преобразуется в соответствующий информационный пакет. Одной из особенностей работы ФПЗС является обеспечение требуемой экспозиции при съемке, которая определяется, помимо условий съемки, относительным отверстием объектива и временем снятия сигнала с пикселя, т.е. выполнением режима временной задержки и накопления, что приводит к необходимости «удержания» в поле зрения $ОЭК_{ДЗЗ}$ снимаемого участка поверхности Земли (тангажирования). В значительно меньшей степени выполнение алгоритма тангажирования требуется для ФПЗС-матрицы, чем для ФПЗС-линейки.

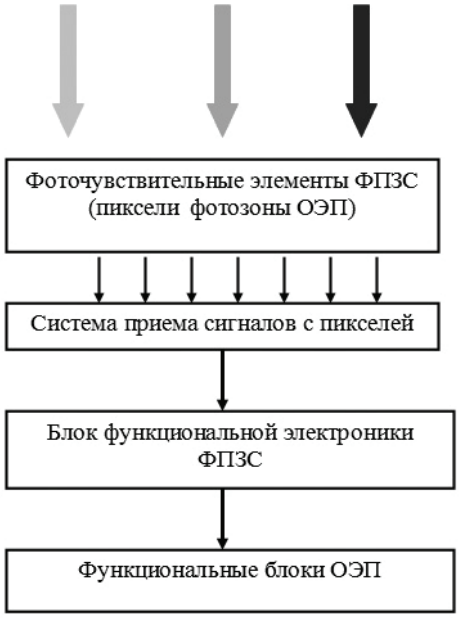



Рис. 2. Обобщенная структурная схема оптико-электронного преобразователя ОЭК$_{ДЗЗ}$

**Работа ОЭК$_{ДЗЗ}$**

Для работы ОЭК$_{ДЗЗ}$ в панхроматическом и мультиспектральном режиме съемки при реализации фотозоны на основе растр-линейки достаточно одной ФПЗС-линейки, в случае же реализации фотозоны на основе растр-матрицы потребуется пара ФПЗС-матриц. В работе рассмотрена возможность применения параллельно-последовательного алгоритма съема информации с ОЭП на основе ФПЗС-линейки для спутников с ОЭК$_{ДЗЗ}$ массой порядка 100 кг, обеспечивающих дистанционное зондирование поверхности Земли в панхроматическом и мультиспектральном режиме без пропусков участков.

Не умаляя общности соотношений, приведенных в работе [2], преобразуем их для случая движения ОЭК$_{ДЗЗ}$ с ОЭП на основе ФПЗС-линейки при наблюдении в надир относительно подспутниковой точки на поверхности Земли в плоскости орбиты без рыскания и крена, что представлено на рис. 3 и соотношениями (1).

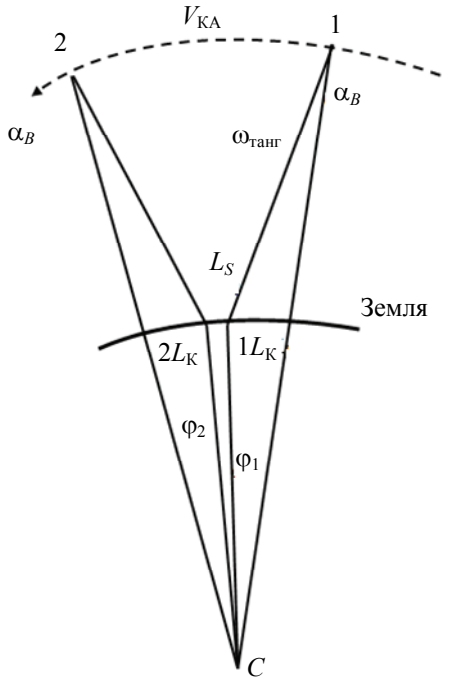



Рис. 3. Плоскость орбиты

$$
\left.
\begin{aligned}
&W_{\text{СДИ}-\text{ОЭП}} = \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}}} = W_{\text{ПСТ}-\text{ОЭП}} - W_{\text{КА}-\text{танг}-\text{ОЭП}};\\
&W_{\text{ПСТ}-\text{ОЭП}} = V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \varphi) \times \frac{f'}{D_H};\\
&W_{\text{КА}-\text{танг}-\text{ОЭП}} = W_{\text{ПСТ}-\text{ОЭП}} - \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}}};\\
&\omega_{\text{танг}}(\alpha_B) = \frac{V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \varphi)}{D_H} - \frac{\delta}{\tau_{\text{пр}} \times f'};\\
&\varphi = \arcsin\left(\frac{D_H}{R_{\text{Земли}}} \times \sin\alpha_B\right); l_{\text{ПП}} = \frac{\delta \times D_H}{f' \times \cos(\alpha_B + \varphi)}\\
&D_H = (R_{\text{Земли}} + H)\cos\alpha_B - \sqrt{R^2_{\text{Земли}} - (R_{\text{Земли}} + H)^2 \times \sin^2\alpha_B}\\
&t_{\text{скан}} = \frac{2\alpha_B}{\omega_{\text{танг}}(\alpha_B)}; L_S = V_{\text{ПСТ}} \times \cos(\alpha_B + \varphi) \times t_{\text{скан}} - 2R_{\text{Земли}} \times \varphi;\\
&Z_W = \frac{W_{\text{ПСТ}-\text{ОЭП}}(\alpha_B)}{W_{\text{СДИ}-\text{ОЭП}}}; Z_\omega = \frac{\omega_{\text{Т}}(\alpha_B = 0)}{\omega_{\text{Т}}(\alpha_B \neq 0)}.
\end{aligned}
\right\} \qquad (1)
$$

В соотношениях (1) приняты следующие обозначения: $V_{\text{КА}}$ – линейная скорость движения КА; $V_{\text{СДИ}}$ – скорость сдвига изображения в фотозоне ОЭП; $V_{\text{ПСТ}}$ – линейная скорость подспутниковой точки; $f'$ – фокусное расстояние объектива ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$; $H$ – высота орбиты КА относительно подспутниковой точки; $W_{\text{СДИ-ОЭП}}$ – необходимая скорость движения изображения для обеспечения требуемой экспозиции при съемке; $\delta$ – размер пикселя фотозоны ОЭП; $W_{\text{КА-танг-ОЭП}}$ – скорость сдвига изображения в фотозоне ОЭП при тангажировании; $\tau_{\text{пр}}$ – необходимое время накопления сигнала на пикселе при съемке (свойство фотозоны); $N$ – число шагов накопления (число повторения засветки пикселя для получения сигнала требуемого уровня); $\omega_{\text{танг}}$ – угловая скорость тангажирования; $1L_{\text{К}}$ и $2L_{\text{К}}$ – величина 1-го и 2-го равных кадров; $l_{\text{ПП}}$ – проекция пикселя на поверхность Земли; $L_S$ – величина слепого (т.е. невидимого) участка поверхности Земли; $\varphi_1$ и $\varphi_2$ – углы между радиусами Земли ($R_{\text{Земли}}$ = 6371 км), проведенными через подспутниковую точку и точку визирования; $\alpha_B$ – угол визирования ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$.

### Анализ результатов расчета параметров для ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$

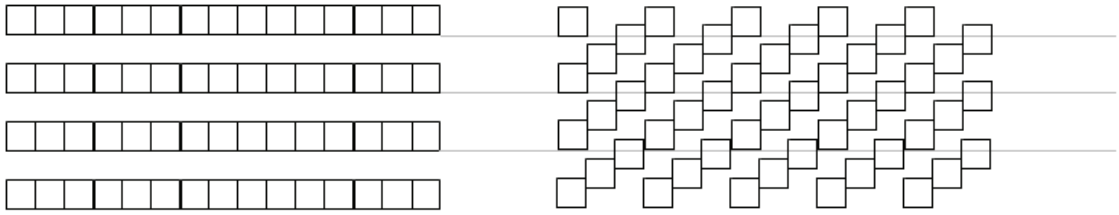
В таблице приведены результаты расчета параметров для ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$ в соответствии с (1).

| Рассчитываемые параметры | Исходные данные ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$ при наблюдении в надир: $H$=575 км; $f'$=1670 мм; $V_{\text{ПСТ}}$=6,948 км/с; $t_{\text{пр}}$=1,5×10$^{-3}$ с; $\delta$=5 мкм; $V_{\text{СДИнадир}}$= 20,18 мм/с; $W_{\text{СДИ-ОЭП}}$=3,333 мм/с | | | |
|---|---|---|---|---|
| | $\alpha_B$= 0° | $\alpha_B$= 10° | $\alpha_B$= 20° | $\alpha_B$=30° |
| $D_H(\alpha_B)$, км | 575 | 584 | 615,6 | 674 |
| $\varphi$ ($\alpha_B$), град | 0 | 0,91 | 1,894 | 3,03 |
| $W_{\text{ПСТ-ОЭП}}$, мм/с | 20,18 | 19,51 | 17,489 | 14,433 |
| $Z_W$ | 6,055 | 5,85 | 5,25 | 4,33 |
| $W_{\text{КА-танг-ОЭП}}$, мм/с | 16,847 | 16,177 | 14,156 | 11,1 |
| $\omega_{\text{танг}}$ ($\alpha_B$), с$^{-1}$ | 0,01009 | 0,00969 | 0,00848 | 0,00665 |
| $Z_\omega$ | 1 | 1,041 | 1,19 | 1,52 |
| $t_{\text{скан}}$ ($\alpha_B$), с | 0 | 34,88 | 69,77 | 104,65 |
| $l_{\text{ПП}}$ ($\alpha_B$), м | 1,7 | 1,78 | 1,99 | 2,41 |
| $L_S$ ($\alpha_B$), км | 0 | 40,1 | 63,83 | 53,71 |

Таблица. Расчет параметров для ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$

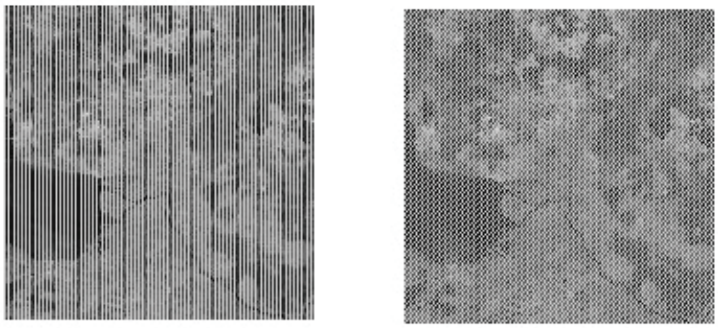
Из анализа таблицы видно, что, если линейное разрешение на местности должно быть не более 2 м, то $\alpha_B$ должно быть не более 20°, а для того, чтобы выдержать необходимое условие экспонирования, необходимо обеспечить замедление скорости движения изображения в 6–5,25 раз. Это возможно только при выполнении тангажирования, т.е. удержание в поле зрения ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$ с ОЭП на основе ФПЗС-линейки снимаемого участка Земли на время $t_{\text{скан}}$ ($\alpha_B$). За время возвращении линии визирования в исходное положение для начала съемки следующего по трассе участка ОЭК$_{\text{ДЗЗ}}$ пролетает участок длиной $L_S$ ($\alpha_B$), который и является пропущенным в процессе ДЗЗ. Полная информация о снимаемом участке поверхности Земли может быть получена при визировании его в течение времени $t_{\text{скан}}$, что равнозначно $Z_W$ . Для сокращения $t_{\text{скан}}$, а соответственно и $L_S$ ($\alpha_B$) разобьем ФПЗС-линейку на ($Z_W$ +1) участков и применим алгоритм параллельно-последовательного сканирования, т.е. на всех участках одновременно последовательно опрашиваются пиксели, что снижает время $t_{\text{скан}}$ в ($Z_W$ +1) раз.

Реализовать это можно, применив «волновой метод» снятия данных с ФПЗС-линейки [3]. Основная идея этого метода заключается в том, что данные снимаются не со всех пикселей одновременно, а выборочно, группами. Такой подход позволяет кардинально изменить структуру выходных данных, снимаемых с линейки. Пусть набор фотоприемных элементов ФПЗС-линейки разбит на группы длиной $N$ элементов, тогда выборки, считываемые за один раз, будут содержать каждый $N$-ый, $N$+1, $N$+2 и т.д. элементы. Каждая группа элементов после того, как с нее будет снят заряд, будет снова переходить в режим накопления, но, так как снятие заряда происходит в разное время, то данные, накапливаемые в соседних ячейках, будут разнесены по времени. Рис. 4 показывает соотношение структур результирующих изображений, полученных классическим способом и с применением «волнового» метода. На рис. 5 приведен пример для $N$=3. Как видно из схемы, использование «волнового» метода позволяет получить информацию о снимаемых областях, которая раньше находилась между строчек изображения, полученного классическим способом. При этом количество точек результирующего изображения остается прежним, меняется только их расположение. Конфигурация пикселей может играть решающую роль в тех случаях, когда в области съемки оказываются узкие объекты, расположенные параллельно снимающей ФПЗС-линейке, например, реки и автострады. Если они окажутся пропущенными в процессе съемки, то их восстановление на основе имеющихся пикселей будет невозможно. Использование «волнового» метода дает на выходе не построчное изображение, а равномерное покрытие области съемки пикселями. Меньшее количество информации об отдельных «строчках» изображения классической съемки компенсируется данными о межстрочных участках.



а б

Рис. 4. Структура изображения информации без использования «волнового» алгоритма съема (а) и с применением «волнового» алгоритма съема (б)



а б

Рис. 5. Результаты моделирования процесса съемки без использования «волнового» метода (а) и с применением «волнового» метода (б)

**Заключение**

Таким образом, анализ состояния и тенденций развития $ОЭК_{ДЗЗ}$ позволяет сделать вывод, что смещение изображения в фотозоне у модернизированной линейки (без использования тангажного замедления) примерно такое же, как у классической линейки (с учетом тангажного замедления). Использование нового типа сенсора позволяет отказаться от операции тангажирования и дает возможность ведения маршрутной съемки, длительность трассы которой ограничена лишь объемами данных, которые можно передать наземным станциям.

**Литература**

1. Демин А.В., Денисов А.В., Летуновский А.В. Оптико-цифровые системы и комплексы космического назначения // Изв. вузов. Приборостроение. – 2010. – № 3. – С. 51–59.
2. Петрищев В.Ф. Оптимальная программа сканирования оптико-электронного телескопического комплекса дистанционного зондирования Земли // Труды Proceedings IIA. Международная академия информатизации. – М.: Зеленоград, 2003. – С. 26–38.

3. Демин А.В., Перл И.А. Волновой алгоритм для работы с линейкой ФПЗС // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3. – С. 19–25.

***Демин Анатолий Владимирович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, dav_60@mail.ru

***Денисов Андрей Васильевич*** – ОАО «ЛОМО», аспирант, www.denisoff@mail.ru

***Перл Иван Андреевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, j-pearl@mail.ru

***Третьякова Анастасия Александровна*** – ОАО «ЛОМО», аспирант, tretyakovaa_17@mail.ru

**УДК 681.786**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СПЕКТРОЗОНАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОСЛАБЛЕНИЯ ВЛИЯНИЯ ВОЗДУШНОГО ТРАКТА В ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМАХ КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ

**О.Ю. Лашманов, А.В. Пантюшин, А.Н. Тимофеев, С.Н. Ярышев**

Рассмотрены возможности использования оценок координат изображения излучающих реперных меток в синей, зеленой и красной областях спектра на матричном приемнике, реализованном по шаблону Байера.

**Ключевые слова:** метод спектрозональный, система оптико-электронная, оценки координат изображений меток.

## Введение

Существующие процедуры обследования технического состояния и экспертизы промышленной безопасности подавляющего большинства зданий и сооружений имеют нерегулярный характер, поэтому с целью предупреждения техногенных катастроф актуально применение распределенных оптико-электронных систем (РОЭС) долговременного и оперативного контроля пространственного положения элементов [1]. Для таких систем необходима возможность обеспечивать параллельные и независимые измерения смещений с погрешностью до 0,1 мм и высокой частотой обновления информации (до 10 кГц) для множества контрольных точек. РОЭС с многоэлементными фотоприемниками (МФП) имеют целый ряд преимуществ по сравнению с остальными методами измерения координат. Потенциальная точность для таких измерителей достигает 0,05 элемента от шага фотоприемной многоэлементной структуры [2]. К тому же комплексирование информации по длине волны оптического излучения в многоканальных РОЭИС с МФП [3] позволяет повысить эффективность работы проектируемых систем.

В современных РОЭС существенное влияние на процессы контроля оказывает среда распространения оптического излучения. Прежде всего, на величину погрешности измерений будут оказывать влияние такие явления в атмосфере, как рефракция и турбулентность воздушного тракта. Рефракция вызывает систематическое отклонение направления распространения оптического излучения, в основном, вследствие температурного градиента показателя преломления воздуха. Одним из способов уменьшения влияния рефракции является использование принципа спектрозональной селекции [4].

Наиболее доступным вариантом для реализации спектрозональной селекции является применение трехканального спектрозонального датчика, у которого каналы соответствуют трем основным цветам системы RGB. В результате такого выбора появляется возможность использования трех независимых спектрозональных каналов с единого фотоприемного матричного поля.

Таким образом, целью настоящей работы являлось изложение результатов исследований принципиальных возможностей и реализации спектрозонального метода для ослабления влияния воздушного тракта при контроле пространственного положения активных визирных марок РОЭИС с МФП.

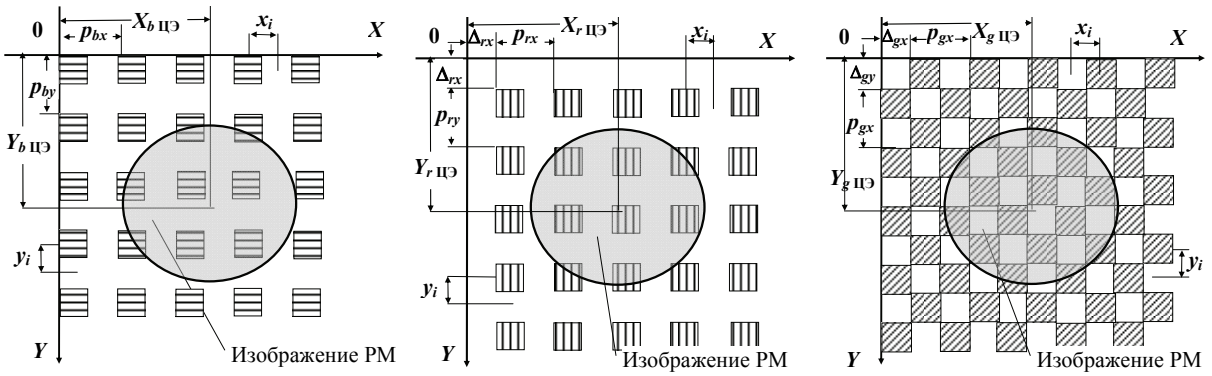
Наиболее доступным вариантом для реализации спектрозональной селекции является применение трехканального спектрозонального датчика, у которого каналы соответствуют трем основным цветам системы RGB. В результате такого выбора появляется возможность использования трех независимых спектрозональных каналов с единого фотоприемного матричного поля. В связи с этим особенностями прикладных исследований являлась оценка характеристик РОЭС для случая реперных меток (РМ), реализованных в виде полупроводниковых излучающих диодов (ПИД) белого цвета.

Вследствие различного количества элементов матричного цветного фотоприемника с байеровским шаблоном для каждого спектрозонального канала требуются различные алгоритмы обработки малоразмерного изображения РМ.

## Алгоритмы оценки координат изображений реперных меток при спектрозональных измерениях

В соответствии с расположением элементов байеровского шаблона для матричного фотоприемника синие элементы (пиксели) занимают нечетные номера элементов матричного поля и располагаются в

нечетных строках (рис. 1, а), красные элементы (пиксели) занимают четные номера элементов и располагаются в четных строках (рис. 1, б), в то время как зеленые элементы (пиксели) занимают четные номера элементов и располагаются в нечетных строках (рис. 1, в), а нечетные номера элементов располагаются в четных строках.




а б в

Рис. 1. Пространственное расположение матричных цветовых полей фоточувствительных элементов единой приемной матрицы в соответствии с байеровским шаблоном:
а – расположение синих полей (горизонтальная штриховка), б – расположение красных полей (вертикальная штриховка), в – расположение зеленых полей (наклонная штриховка)

Шаг синих элементов $P_{bx}$ и $P_{by}$ по координатам $0X$ и $0Y$ будет составлять удвоенную величину по сравнению с шагом матричного поля $x_i$ и $y_i$ по соответствующим координатам:

$P_{bx} = P_x,\ P_{by} = P_y$.

Для функционирования алгоритма оценки координат малоразмерного объекта методом энергетического центра тяжести требуется, чтобы линейные размеры изображения РМ составляли не менее 4–5 размеров элемента (пикселя) [2]. В этом случае вычисление оценки координат центра изображения $X_{b\,\text{ЦЭ}}$ и $Y_{b\,\text{ЦЭ}}$ (рис. 1, а) для синей области спектра можно производить по формулам

$$X_{b\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_i(x_i)\, x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} Q_i(x_i)}}{M} 2\,; \qquad Y_{b\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=N} \frac{\sum_{i=0}^{i=M} [Q_i(y_i)\, y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M} Q_i(y_i)}}{N} 2\,,$$

где $x_i$, $y_j$ – координаты элементов, входящих в окрестность $M \times N$; $M$, $N$ – величина окрестности, содержащей изображение объекта $M$ (при этом, для квадратных областей $M=N$); $Q_j(x_i)$ – суммарный сигнал с элементов $j$-ой строки, входящих в окрестность $M$ ; $Q_i(y_i)$ – суммарный сигнал с элементов $i$-го столбца, входящих в окрестность $M$.

Для красного канала шаг элементов $P_{rx}$ и $P_{ry}$ (рис. 1, б), как и в синем канале, по координатам $0X$ и $0Y$ будет составлять удвоенную величину по сравнению с шагом матричного поля $x_i$ и $y_i$ по соответствующим координатам:

$P_{rx} = P_x,\ P_{ry} = P_y$.

В этом случае вычисление оценки координат центра изображения $X_{r\,\text{ЦЭ}}$ и $Y_{r\,\text{ЦЭ}}$ для используемой системы координат $0XY$ в красной области спектра можно производить по аналогичным формулам синего канала:

$$X_{r\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=M} \frac{\sum_{i=0}^{i=N} [Q_i(x_i)\, x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N} Q_i(x_i)}}{M} 2 + \Delta_{rx}\,; \qquad Y_{r\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=N} \frac{\sum_{i=0}^{i=M} [Q_i(y_i)\, y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M} Q_i(y_i)}}{N} 2 + \Delta_{ry}\,.$$

При искусственном разделении на два зеленых канала в первом канале оставим только те зеленые элементы, которые принадлежат нечетным строкам. Тогда для введенной системы координат $0XY$ значения оценок координат центра изображения $X_{g1\,\text{ЦЭ}}$ и $Y_{g1\,\text{ЦЭ}}$ (рис. 1, в) составят

$$X_{g1\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=M}\frac{\sum_{i=0}^{i=N}[Q_i(x_i)\,x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N}Q_i(x_i)}}{M}2 + \Delta_{gx}; \quad Y_{g1\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=N}\frac{\sum_{i=0}^{i=M}[Q_i(y_i)\,y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M}Q_i(y_i)}}{N}2,$$

где $\Delta_{gx}$ – горизонтальная координатная поправка для первого зеленого канала, при этом $\Delta_{gx} = P_{gx}/2$.

Для второго, зеленого канала используются только четные строки. Тогда оценки координат центра изображения $X_{g2\,\text{ЦЭ}}$ и $Y_{g2\,\text{ЦЭ}}$ для второго канала вычисляются по формулам

$$X_{g2\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=M}\frac{\sum_{i=0}^{i=N}[Q_i(x_i)\,x_i]}{\sum_{i=0}^{i=N}Q_i(x_i)}}{M}2; \quad Y_{g2\,\text{ЦЭ}} = \frac{\sum_{j=0}^{j=N}\frac{\sum_{i=0}^{i=M}[Q_i(y_i)\,y_i]}{\sum_{i=0}^{i=M}Q_i(y_i)}}{N}2 + \Delta_{gy},$$

где $\Delta_{gy}$ – горизонтальная координатная поправка для первого зеленого канала, при этом $\Delta_{gxy} = P_{gy}/2$.

Тогда суммарное значение оценки координат центра изображения в зеленом канале может быть вычислено как среднее арифметическое оценок двух раздельных зеленых каналов:

$$X_{g\,\text{ЦЭ}} = \frac{X_{g1\,\text{ЦЭ}} + X_{g2\,\text{ЦЭ}}}{2}; \quad Y_{g\,\text{ЦЭ}} = \frac{Y_{g1\,\text{ЦЭ}} + Y_{g2\,\text{ЦЭ}}}{2}.$$

Анализируя оценки координат изображения белой (RGB) реперной метки в трех спектральных диапазонах, можно при контроле пространственного положения метки синхронно определять и характеристики воздушного тракта (например, градиент температуры). В этом случае с помощью цветной видеокамеры, используя дисперсионный метод [4], можно ослаблять вредное воздействие воздушного тракта на процесс измерений пространственного положения реперной метки.

Для оценки практических возможностей рассматриваемого метода проводилось физическое моделирование процесса измерения пространственного положения реперной метки на специальном стенде.

### Описание физической модели для оценки реализуемости спектрозонального метода

В физической модели РОЭС, основанной на спектрозональном методе, излучение от белой РМ проходит через объектив и попадает на матричное фотоприемное устройство, сообщающееся с персональным компьютером при помощи блока интерфейса камеры. Через блок интерфейса камера может получать команды от персонального компьютера, такие как разрешение передаваемого видеосигнала, контрастность или способ получения видеоинформации. В физической модели РОЭС использовалась камера VEC-545 (матрица КМОП OV5620 формата 1/2,5″ с размером пикселя 2,2×2,2 мкм, объектив «Юпитер-9»). В качестве РМ использован белый ПИД FYL3914WC RGB, создающий оптическое излучение в трех спектральных диапазонах ($\lambda_{max}$= 470, 525 и 625 нм) и питающийся от блока.

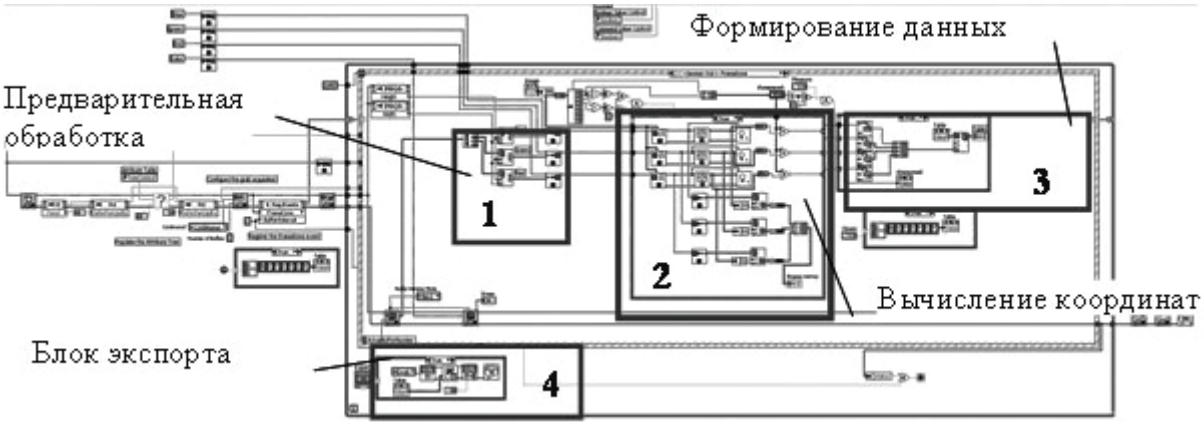



Рис. 2. Элемент блок-диаграммы цикла программы в среде LabView

Для управления физической моделью РОЭС разработана специальная компьютерная программа в среде разработки LabView. Сигнал, поступающий от цифровой фотоприемной камеры испытуемого канала или системы, передается на блок предварительной обработки 1 (рис. 2), где сначала из поступившего электрического сигнала цифрового изображения выбирается необходимый цветовой канал, а затем из

сформированного изображения выбирается интересующая область (или области). Далее отфильтрованное изображение попадает в блок вычисления координат РМ 2. После проведения измерения результат записывается в таблицу результатов, которая может быть экспортирована в формат Excel при помощи блока экспорта 3. Измерения могут производиться одновременно в трех цветовых каналах и нескольких областях изображения.

**Экспериментальные исследования характеристик определения координат изображений РМ**

Целью экспериментальных исследований являлось доказательство возможности реализации спектрозонального метода в РОЭС с помощью серийно выпускаемой камеры, каналы которой соответствуют трем основным цветам системы RGB. В качестве доказательств реализуемости метода использовались оценки систематической и случайной составляющих погрешностей измерения координат, по которым можно также судить и о качестве оценок среднеквадратического отклонения и оценок координат при многократных измерениях.

Для каждого из цветовых каналов камеры было проведено по три серии измерений координат изображений, в каждой из которых было проделано по 1000 измерений. Результаты записывались синхронно во всех каналах, что позволяет вычислить устойчивость показаний в процессе времени при многократных измерениях. В результате было определено положение центра изображения РМ для каждого из каналов. Среднее значение смещения центров РМ в красном и синем канале относительно зеленого (калибровочного) составляет 0,5 пикселя, что подтверждает теоретические выкладки. При этом стоит отметить, что величина среднеквадратической погрешности не превышала 0,02 пикселя.

В ходе эксперимента было определено, что при отсутствии температурного градиента разница в смещении энергетических центров изображения в различных цветовых каналах не превышает 0,04 пикселя, и при перемещении реперной марки ее изображение перемещается на одинаковую величину во всех цветовых каналах. При исследованиях влияния температурного градиента тракта на точность определения координат РМ было выявлено, что СКО определения центра изображения во всех каналах в вертикальном направлении возросло до 1,5 пикселя, в то время как в горизонтальном – до 0,6 пикселей. При этом показано, что наибольшая чувствительность к температурному градиенту обладает пара зеленый-красный канал (таблица).

| | Синий-красный | Синий-зеленый | Зеленый-красный |
|---|---|---|---|
| При локальном градиенте температуры до 0,01°/м | 0,230 | 0,112 | 0,342 |
| В нормальных лабораторных условиях | 0,135 | 0,007 | 0,128 |

Таблица. Средняя величина разности координат центров изображений РМ в различных цветовых каналах (все значения в таблице приведены в пикселях)

**Заключение**

Предложены алгоритмы пересчета оценки координат изображений активных РМ при спектрозональных измерениях к единому матричному полю анализа МФП.

На реализованной установке доказана возможность обеспечивать оценку СКО результата измерения положения изображения РМ не более 0,04 пикселя на выпускаемых серийно видеокамерах VEC-545 синхронно в трех спектральных диапазонах.

Экспериментальные исследования показали, что предложенный способ спектрозональных измерений координат активных РМ в поле зрения единого цветного МФП позволяет регистрировать воздействие градиента температур воздушного на процесс контроля РОЭС.

На основе полученных результатов целесообразно провести развитие методов спектрозональной селекции и адаптивных алгоритмов с целью ослабления влияния атмосферной трассы (дисперсии и турбулентности) и перекрестных связей между каналами.

Работа проводилась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по государственному контракту № П1112 от 26 августа 2009 г.

**Литература**

1. Богатинский Е.М., Коротаев В.В., Мараев А.А., Тимофеев А.Н. Исследование путей ослабления влияния воздушного тракта в распределенных оптико-электронных системах предупреждения техногенных катастроф // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 3(67). – С. 130.
2. Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г. Сравнение некоторых способов определения координат изображений, осуществляемых с помощью многоэлементных приемников излучения // Изв. вузов. Приборостроение. – 1986. – № 9. – С. 62–69.

3. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Логос, 2007. – 192 с.
4. Latyev S.M., Pankov E.D., Prokofjev A.V., Tymofeev A.N. Refraction's slacking in optoelectronic systems for positioning of elements of ecological dangerous objects // Proc. SPIE. – 2004. – V. 5381. – P. 157–163.

***Лашманов Олег Юрьевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, o.lashmanov@gmail.com

***Пантюшин Антон Валерьевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, pantyushin@ya.ru

***Тимофеев Александр Николаевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, зав. лабораторией, timofeev@grv.ifmo.ru

***Ярышев Сергей Николаевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, ysn63@mail.ru

**УДК 681.785**

# КОРРЕКЦИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ УФ РАДИОМЕТРА СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

**В.В. Антонов, Г.Г. Ишанин**

Рассматривается возможность измерения спектрозональных энергетических эффективных величин в ультрафиолетовой области спектра, основанная на измерении спектрального состава излучения исследуемого источника с последующей компьютерной обработкой информации. Традиционное решение этих задач связано с созданием обширного ряда спектрозональных приборов, имеющих индивидуальные спектральные характеристики чувствительности. Спектральная коррекция чувствительности фотоприемников, используемых в таких приборах – зачастую далеко не простая задача, решение которой сопряжено с неоправданным удорожанием измерительного прибора в целом. Предлагаемый метод определения спектрозональной облученности объектов в любом заданном участке спектра представляется перспективным.

**Ключевые слова:** спектрозональный метод, спектрофотометрический метод, эффективные величины, полихроматор.

## Введение

Сегодня в промышленности широко используются различные источники ультрафиолетового (УФ) излучения. Применение УФ излучения очень разнообразно, а качество технологического процесса зачастую зависит от спектрозональной облученности в узких спектральных интервалах. Вместе с тем УФ излучение может оказывать вредное влияние на человека и на окружающую среду. Существуют санитарные нормы, которые регламентируют безопасные значения УФ облученности для человека по зонам. Международная комиссия по освещению (МКО) в 1963 г. предложила разделить УФ излучение на три зоны: УФ-А – от 315 до 400 нм; УФ-В – от 280 до 315 нм; УФ-С – от 200 до 280 нм [1]. В связи с этим возникает необходимость измерения спектрозональной УФ облученности в этих спектральных интервалах.

Условно все современные УФ радиометры можно разделить на два класса: спектрозональные и спектрофотометрические. Несмотря на широкий выбор УФ радиометров, как отечественного, так и иностранного производства, большинство из предлагаемых приборов имеют ряд существенных недостатков.

Так спектрозональные УФ радиометры для измерения облученности в зонах А, В и С имеют три фотометрические головки с индивидуальными спектральными характеристиками чувствительности. Обычно они используют один селективный приемник излучения на внутреннем фотоэффекте, спектральная чувствительность которого приводится к заданной фильтрами. Неселективные тепловые приемники излучения с достаточной УФ чувствительностью отсутствуют. Существенными для спектрозональных УФ радиометров являются большая погрешность измерений и нецелесообразность их использования для измерения излучения УФ источников с линейчатым спектром излучения, так как для них погрешность измерения облученности может достигать 100% и более, несмотря на заявленную производителем погрешность измерений 10%. Например, УФ радиометры фирмы PRC Krochmann GmbH имеют погрешность измерения облученности 8%. Погрешности измерения облученности УФ радиометра, выпускаемого фирмой Konica Minolta, составляют в зонах А, В и С 5%, 7% и 10% соответственно. Следует заметить, что с такой погрешностью, судя по спектральным характеристикам приборов, можно измерить ограниченное число источников УФ излучения [2]. Также к недостаткам спектрозональных приборов следует отнести технологическую сложность подбора стеклянных оптических фильтров, с помощью которых корректируется спектральная чувствительность приемника оптического излучения радиометра, номенклатура которых ограничена количеством материалов, пропускающих УФ излучение. Для точных измерений в лабораторных условиях используются спектрофотометрические приборы, которые позво-

ляют измерять большинство контролируемых энергетических и эффективных величин с большой точностью, однако их применение в промышленных условиях не представляется возможным.

Производители современных промышленных УФ радиометров используют различные методы, чтобы повысить точность измерительных средств. Однако, несмотря на множество разработанных методов, решить данную проблему можно лишь для определенного типа источников. Это связано, прежде всего, с принципами построения самого измерительного средства. С появлением новых типов УФ источников излучения известные методы измерения не позволяют получать требуемые метрологические характеристики.

Таким образом, в последнее время сформировался целый ряд научно-технических проблем, которые можно разрешить спектрофотометрическим методом. Разработанный на основе этого метода спектральный УФ радиометр «ТКА-УФ» позволяет измерять УФ облученность источников не только в трех регламентированных зонах, но и в любом желаемом спектральном интервале. Небольшой переносной прибор имеет одну фотометрическую головку, которая подключается к компьютеру. Программное обеспечение позволяет получать также информацию о спектральном распределении потока исследуемого излучения в виде графика на экране монитора. Наличие программного обеспечения также дает возможность вычислять бактерицидную или эритемную эффективности источников излучения.

**Спектрозональный метод**

В настоящее время к промышленному измерению параметров УФ излучения подходят, основываясь на спектрозональном методе измерения. Типичный спектрозональный УФ радиометр состоит из ряда простых оптических элементов (рис. 1). Излучение проходит через диафрагму 1, которая ограничивает поле зрения системы. Для улучшения пространственной характеристики приемника часто после диафрагмы располагают матовое стекло 2. Оптический фильтр 3 служит для выделения спектральной области, в которой работает радиометр. В качестве приемника оптического излучения (ПОИ) 4 обычно используют фотодиод [2].

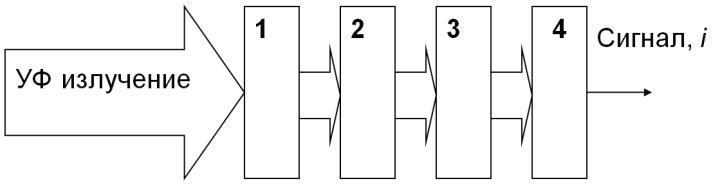



Рис. 1. Структурная схема спектрозонального прибора

Спектрозональный метод обладает рядом преимуществ (простота использования, скорость получения результата и т. п.) и широко используется в промышленности. При этом идеальный УФ радиометр в рабочем спектральной диапазоне должен обладать относительной спектральной чувствительностью, равной 1, а вне границ она должна быть равна 0. Спектральная чувствительность идеального прибора показана на рис. 2. Для работы в УФ области спектральные характеристики приемников максимально приближают к заданной эффективности или к П-образному виду.

Рис. 2. Относительная спектральная чувствительность идеального УФ радиометра

Как было отмечено, в УФ радиометрах спектрозонального типа коррекция спектральной чувствительности ПОИ осуществляется с помощью стеклянных оптических фильтров. Несоответствие спектральной чувствительности УФ радиометра идеальной (рис. 2) приводит к значительным погрешностям в измерении спектрозональной облученности от источников со сложным спектральным составом [3]. Эта

погрешность может достигать значительных величин. Сигнал, снимаемый с ПОИ, определяется по формуле:

$$i = \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \Phi_{e\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \partial\lambda \,, \qquad (1)$$

где $\Phi_{e\lambda}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности потока излучения, падающего на радиометр, Вт/нм; $S(\lambda)$ – значение абсолютной спектральной чувствительности УФ радиометра, А/Вт.

Так как сигнал, вычисляемый по формуле (1), зависит от спектрозонального потока излучения, то при воздействии потоков различных источников УФ излучения (например, с одинаковой энергией излучения, но с разным спектральным распределением, выходящим за пределы спектральной чувствительности прибора) получаются разные сигналы. Отличие формы спектральной характеристики чувствительности ПОИ радиометра от формы для идеальной головки (рис. 2) в процессе измерений можно учесть вводом поправочного коэффициента отличия для каждого типа источника излучения. Поправочный коэффициент отличия определяется расчетным путем как отношение сигналов, полученных при действии данного типа источника излучения на идеальную и реальную головки [1]:

$$K_{\text{попр}} = \frac{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \Phi_{e\lambda}^{\text{ист}}(\lambda) \cdot S^{\text{ид}}(\lambda) \partial\lambda}{\int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \Phi_{e\lambda}^{\text{ист}}(\lambda) \cdot S^{\text{пр}}(\lambda) \partial\lambda}, \qquad (2)$$

где $\lambda_1$ и $\lambda_2$ – границы спектральной зоны облученности, нм; $\Phi_{e\lambda}^{\text{ист}}(\lambda)$ – распределение спектральной плотности потока излучения измеряемого источника; $S^{\text{ид}}(\lambda)$ – относительная спектральная характеристика чувствительности идеального прибора; $S^{\text{пр}}(\lambda)$ – относительная спектральная чувствительность реального прибора. Ввод поправочного коэффициента, вычисленного по формуле (2), позволяет значительно повысить точность спектрозональных УФ радиометров. Однако данная методика имеет свои ограничения. Для достижения более высоких точностей измерения спектрозональной УФ облученности требуется метод измерения, принципиально отличный от предыдущего.

### Спектрофотометрический метод

Искомый спектрозональный поток излучения, падающий на радиометр, можно получить, интегрируя функцию распределения спектральной плотности потока излучения в заданном спектральном диапазоне [4]:

$$\Phi_e(\lambda) = \int_{\lambda 1}^{\lambda 2} \Phi_{e\lambda}(\lambda) d\lambda \,.$$

Такой путь определения спектрозональной облученности в выбранном спектральном интервале $\lambda_1$ до $\lambda_2$ в УФ области спектра с компьютерной обработкой результатов решает многие проблемы, присущие приборам классического типа. Он дает возможность отказаться от коррекции спектральной чувствительности фотоприемников стеклянными оптическими фильтрами и тем самым свести к минимуму суммарную погрешность измерения спектрозональной облученности.

Рассмотрим образование спектра диспергирующими системами с селективной фильтрацией, т.е. с пространственным разделением по длинам волн. В результате таких явлений, как дисперсия или дифракция света, поток оптического излучения после прохождения диспергирующей системы раскладывается в спектр. Причем каждая монохроматическая составляющая падающего потока излучения, в зависимости от параметров диспергирующей системы, занимает строго определенное положение. Если поместить многоэлементный приемник оптического излучения (МПОИ) в фокальную плоскость диспергирующей системы, то каждый элемент МПОИ будет регистрировать поток излучения только определенной монохроматической составляющей исследуемого излучения.

Сигнал $P_{\lambda i}$, снимаемый с каждого элемента МПОИ, представляет собой произведение спектральной чувствительности этого элемента $S_{\lambda i}$ на монохроматическую составляющую $\Phi_{\lambda i}$ падающего на него потока:

$$P_{\lambda i}(\lambda) = S_{\lambda i}(\lambda) \cdot \Phi_{\lambda i}(\lambda) \,.$$

Если известно спектральное распределение падающего потока излучения $\Phi_{\lambda i}(\lambda)$, то легко получить спектральную чувствительность $S_{\lambda i}$ каждого элемента. Для этого можно использовать излучение фотометрической лампы с известным табулированным значением спектральной плотности потока излучения. Зная реальную чувствительность каждого элемента МПОИ, можно получить необходимые попра-

вочные коэффициенты для этого элемента, чтобы привести спектральную чувствительность УФ радиометра к идеальной П-образной кривой для вычисления спектрозональной облученности входной щели УФ радиометра. Поправочный коэффициент можно получить из выражения

$$S_{\lambda i}(\lambda) = k_{\lambda i} \cdot \frac{P_{\lambda i}(\lambda)}{\Phi_{\lambda i}^{\text{таб}}(\lambda)}, \qquad (3)$$

где $k_{\lambda i}$ – поправочный коэффициент, учитывающий усиление сигнала для $i$-го элемента МПОИ, вырабатываемого микропроцессором; $\Phi_{\lambda i}^{\text{таб}}$ – спектральная плотность потока излучения стандартного источника.

Используя различные коэффициенты усиления $k_{\lambda i}$ в электронном тракте, можно изменять чувствительность элемента МПОИ к данной (падающей на него) длине волны (3). Таким образом, можно корректировать спектральную чувствительность УФ радиометра в любом заданном спектральной интервале и привести ее к любому виду, в том числе и к П-образному при $S_\lambda(\lambda) = 1$.

На основе спектрофотометрического метода был создан УФ радиометр ТКА-УФ, показанный на рис. 3. УФ радиометр модели ТКА-УФ представляет собой полихроматор на основе вогнутой дифракционной решетки с регистрацией излучения, разложенного фотодиодной линейкой, и микропроцессорным управлением, выдающий цифровые данные на совместимый с ОС Windows® PC компьютер – ASUS® Eee PC 701. Конструктивно прибор состоит из двух функциональных блоков – оптоэлектронного блока и блока обработки сигнала, связанных между собой гибким многожильным кабелем.

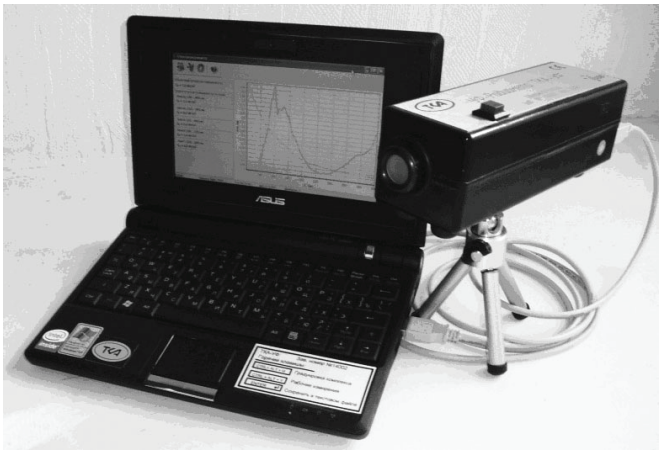



Рис. 3. Внешний вид УФ радиометра ТКА-УФ

Принцип действия прибора основан на измерении спектра излучения источников оптического излучения в УФ области 210–400 нм с последующей математической обработкой результатов измерения с помощью микропроцессорного устройства.

Оптоэлектронный блок представляет собой полихроматор, показанный на рис. 4. Излучение от измеряемого УФ источника 1 попадает на входное устройство, в котором находятся матовое кварцевое стекло 2 и входная щель 3. Матовое кварцевое стекло 2 устанавливается во входном устройстве для равномерного освещения входной щели 3. Спектральный коэффициент пропускания кварцевого стекла имеет крутой фронт и начинается с 210 нм. Это позволяет устранить влияние вторых порядков, неизбежно возникающих при работе с дифракционными решетками. В качестве диспергирующего элемента используется вогнутая дифракционная решетка 4. Она фокусирует спектр на МПОИ 5, с которого снимается сигнал для последующей обработки и вычисления измеряемых спектрозональных величин УФ излучения.

Полихроматор построен по схеме Пашена–Рунге, в которой входная щель, дифракционная решетка и выходная щель (или ПОИ) помещаются на круге Роуланда (рис. 4). Ширина входной щели выбирается в зависимости от необходимого спектрального разрешения полихроматора. Как показано в [1], для проведения арбитражных измерений энергетических эффективных величин различных УФ источников спектральное разрешение диспергирующей системы должно быть не более 5 нм. Как показали исследования, при использовании вогнутой решетки радиусом $R$=125 мм с числом штрихов 300 мм$^{-1}$ для выбранной оптической схемы полихроматора спектральное разрешение достигает значения 3 нм, что вполне обеспечивает требуемую точность в определении распределения спектральной плотности измеряемого потока излучения.

В качестве МПОИ в УФ радиометре используется гибридная фотодиодная линейка (ФДЛ) с регистром считывания на ПЗС-основе с косвенной связью через активные элементы, которые осуществляют считывание, временную задержку и накопление информационного сигнала [3]. Выбранная линейка ФДЛ S3901 фирмы Hamamatsu обладает повышенной чувствительностью в УФ области спектра. Выбор подоб-

ного типа МПОИ позволяет упростить конструкцию и повысить эксплуатационные характеристики прибора. ФДЛ имеют, по сравнению с ПЗС, более высокую линейность энергетической характеристики и больший динамический диапазон по облученности. Для управления работой ФДЛ достаточно подачи всего лишь двух управляющих сигналов, а все остальное преобразование осуществляется за счет внутренней структуры самой линейки, так как в каждом фоточувствительном элементе находится активная схема усиления сигнала. Это позволяет повысить быстродействие и повысить помехоустойчивость системы [1].

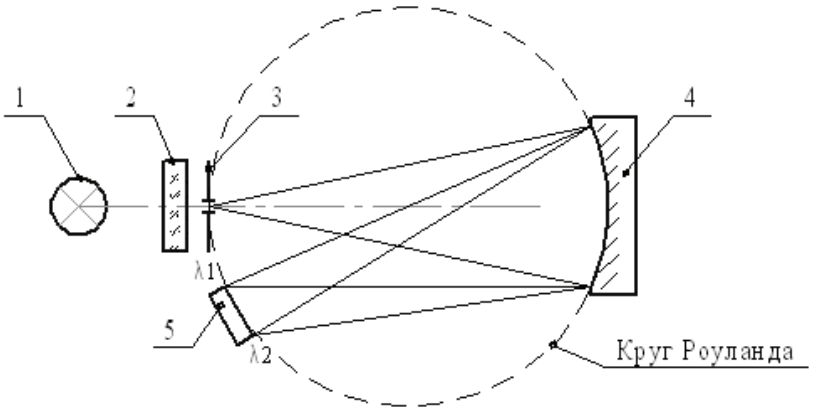



Рис. 4. Оптическая схема полихроматора

Исследование метрологических характеристик УФ радиометра ТКА-УФ показали, что прибор данного типа позволяет измерять спектрозональную облученность различных источников оптического излучения, в том числе и со сложным спектральным составом. В таблице приведены погрешности измерения спектрозональной облученности, создаваемой различными источниками УФ излучения. Исследовались характеристики спектрозонального прибора ТКА-ПКМ (12) и спектрофотометрического УФ радиометра ТКА-УФ. В качестве исследуемых источников были взяты стандартные лампы: ЛУФ – люминесцентная ртутная ультрафиолетовая лампа; МГЛ – металлогалогенная лампа; Дейтер. – дейтериево-неоновая лампа низкого давления. Как видно из таблицы при сложном спектральном составе излучения погрешность для прибора спектрозонального типа может достигать значительных величин. При этом спектрофотометрический метод позволяет учесть спектральные особенности УФ источника. Точность измерения спектрозональной облученности ТКА-УФ намного выше по сравнению с приборами спектрозонального типа.

| **Тип лампы** | **Погрешность измерения** | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | зона А | | зона В | | зона С | |
| | ТКА-ПКМ (12) | ТКА-УФ | ТКА-ПКМ (12) | ТКА-УФ | ТКА-ПКМ (12) | ТКА-УФ |
| ЛУФ | 7% | 5% | 110% | 4% | – | 3% |
| МГЛ | 6% | 3% | 8% | 3% | 30% | 3% |
| Дейтер. | 10% | 2% | 50% | 2% | 232% | 2% |

Таблица. Погрешность измерения спектрозональной энергетической облученности

**Заключение**

На сегодняшний день большинство приборов для измерения энергетических эффективных величин в УФ области спектра относятся к спектрозональному типу с индивидуальными спектральными характеристиками чувствительности. Однако данный вид измерительной аппаратуры, обладая рядом преимуществ, не может обеспечить быстро растущие требования по точности для современной промышленности. УФ радиометр ТКА-УФ на основе спектрофотометрического метода фотометрических измерений позволяет измерять спектрозональную облученность различных источников УФ излучения, в том числе со сложным спектральным составом, с погрешностью 2–5%, в то время как у спектрозонального прибора типа ТКА-ПКМ (12) с индивидуальной спектральной характеристикой чувствительности погрешность может достигать 230%.

**Литература**

1. ГОСТ Р 8.590-2001. Средства измерений характеристик ультрафиолетового излучения в охране труда. – Введ. 01.07.2002. – М.: Госстандарт, 2002. – 24 с.

2. Кузьмин В.Н. Разработка и исследование приборов для измерения параметров и характеристик источников оптического излучения // Дис. … д.т.н. – СПб, 2007. – С. 49–50.
3. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Челибанов В.П. Приемники излучения: Учебное пособие для вузов. – СПб: Папирус, 2003. – 527 с.
4. Ишанин Г.Г., Козлов В.В. Источники излучения: Учебное пособие для вузов. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 395 с.

***Антонов Владимир Владимирович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, snoop_85@mail.ru

***Ишанин Геннадий Григорьевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, snoop_85@mail.ru

**УДК 535.551**

# ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ В ПНЕВМООПТИЧЕСКОМ ТОНОМЕТРЕ

**К.Ю. Кузнецов, Ю.Т. Нагибин, В.А. Трофимов, С.А. Алексеев**

Разработана оптико-электронная методика обработки информации при пневмооптическом бесконтактном измерении внутриглазного давления. Выполнен анализ ограничений при реализации схемы измерения при гармонической деформации роговицы глаза.

**Ключевые слова:** внутриглазное давление, роговица глаза, тонометр, глаукома.

## Введение

Развитие техники медико-биологических исследований предъявляет к используемым приборам особые требования. Наряду с такими параметрами как точность, быстродействие, информативность, предъявляются повышенные требования к объективности и удобству проведения измерений, наглядности отображения информации, компактности и снижению себестоимости измерительной техники.

Одной из актуальнейших задач в области медицины является борьба с широко распространенным заболеванием – глаукомой. Особенность этого заболевания состоит в том, что оно является одной из наиболее частых причин слепоты. Успех лечения зависит от ранней диагностики глаукомы. Но на ранней стадии заболевания, как правило, единственным симптомом, характеризующим его, является внутриглазное давление (ВГД). Для успешного проведения профилактических работ в этом случае необходима техника, обеспечивающая высокую производительность и низкую себестоимость измерений. Эти требования к качеству приборов могут быть реализованы с помощью бесконтактных оптических методов измерений ВГД.

В настоящее время применение получили «бесконтактные» оптико-электронные тонометры [1–5]. В основу этих приборов положен метод пневматической аппланации роговицы, измерение величины которой позволяет определить ВГД. Эти приборы, безусловно, знаменуют собой прогресс в области тонометрии, но из-за пневматического воздействия на глаз их можно назвать бесконтактными лишь условно. Действительно, для изменения формы роговицы глаза требуется достаточно высокое давление в «рабочей» струе воздуха, которое вследствие инерционности процесса измерения вызывает ее избыточную деформацию. Кроме того, аппланация оказывает заметное воздействие на все процессы, происходящие в глазном яблоке, в том числе и на измеряемую величину. Одним из свойств таких приборов является необходимость активного участия пациента в процессе измерения, что требует удовлетворительного качества его зрения и состояния роговицы. В противном случае проведение измерений становится невозможным.

Рассмотренные выше недостатки тонометров определяют необходимость поиска новых методик измерения ВГД. В связи с этим особый интерес могут представлять исследования в разработке пневмооптических методов измерения ВГД.

## Оптико-электронная методика обработки информации

Пусть на роговицу глаза падает световой пучок под углом $\varphi_0$ к оптической оси глаза (рис. 1). Можно показать, что угол отражения $\beta$ зависит от $\varphi_0$, радиуса кривизны роговицы $R$ и координаты $y$ точки падения:

$$\beta = \varphi_0 + 2y/R\,.$$

При пневматическом воздействии атмосферное давление $p_a$ вблизи поверхности роговицы изменяется (увеличивается) на величину $\Delta p_a$, т.е. $p_a = p_{a0}+\Delta p_a$, где $p_{a0}$ – атмосферное давление без воздействия. Это приводит к соответствующему изменению радиуса кривизны роговицы на величину $\Delta R$.

В работе [6] показано, что малое изменение угла $\Delta\beta$ равно

$$\Delta\beta = -\frac{\Delta p_a}{\sigma}\left[ y - \frac{\varphi_0\left(d^2 - y^2\right)}{4\sigma} P \right], \qquad (1)$$

где $P$ – значение ВГД; $\sigma$ – коэффициент поверхностного натяжения; $d$ – координата падения светового пучка на роговицу глаза после деформации.

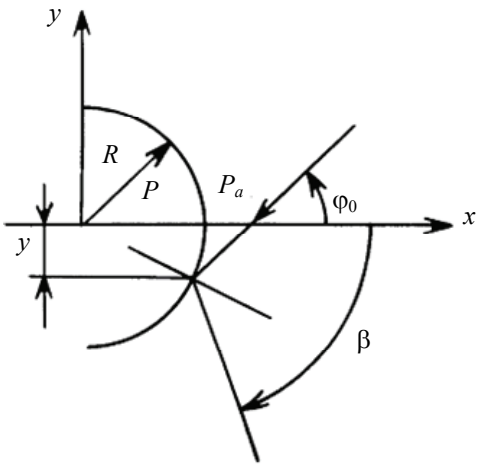



Рис. 1. Схема падения светового пучка на роговицу глаза: $\varphi_0$ – угол падения; $\beta$ – угол отражения; $R$ – радиус кривизны поверхности роговицы; $y$ – координата падения светового пучка на роговицу глаза

Предположим, что на роговицу глаза действует периодическое пневматическое воздействие (например, гармоническое с частотой $\omega$), т.е. атмосферное давление вблизи поверхности роговицы изменяется во времени по закону

$$P_a = P_{a0}\sin\omega t.$$

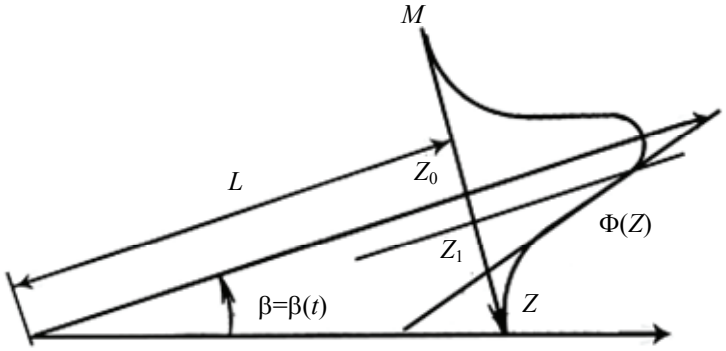



Рис. 2. Распределение интенсивности отраженного от роговицы света в плоскости $M$, удаленной от роговицы на расстояние $L$

Пусть наблюдается распределение интенсивности света $\Phi(Z)$, отраженного от роговицы, в плоскости $M$, удаленной от поверхности роговицы на расстояние $L$ (рис. 2). В плоскости $M$ расположен фотоприемник с установленной перед ним щелевой диафрагмой, расположенной на расстоянии $Z_1$ от центра $\Phi(Z)$ (на участке квазилинейного спада функции $\Phi(Z)$, рис. 2). Обозначим функцию пропускания диафрагмы $\varphi(Z)$. Тогда сигнал фотоприемника будет равен

$$U = S\int_{-\omega}^{\omega} \Phi(Z)\varphi(Z)dZ\,, \qquad (2)$$

где $S$ – чувствительность фотоприемника. На участке квазилинейного спада функцию $\Phi(Z)$ (рис. 2) аппроксимируем линейной зависимостью вида

$$\Phi(Z) = A - kZ,$$

где $k$ – угловой коэффициент; $A$ – коэффициент линейного смещения, а функцию $\varphi(Z)$ – дельта-функцией

$$\varphi(Z) = \delta(Z - Z_1).$$

Тогда из (2) следует:

$$U = S\int_{-\omega}^{\omega} (A - kZ)\delta(Z - Z_1)dZ = \eta(A - kZ_1)\,.$$

При периодическом изменении $p_a$ смещение всех точек распределения интенсивности света $\Phi(Z)$ будет равно

$$\Delta Z_0 = \Delta Z_1 \approx L\Delta\beta = L\Delta\beta_0 \sin\omega t,$$

где $\Delta\beta_0$ – амплитуда угловых колебаний отраженного от роговицы света. Тогда, очевидно, сигнал фотоприемника будет равен

$$U = S(A - k(Z_1 + \Delta Z_1)) = S(A - k\Delta Z_1 - kL\Delta\beta_0 \sin\omega t),$$

т.е. переменная составляющая сигнала $U(t)$

$$U(t) \sim SkL\Delta\beta_0 \sin\omega t.$$

Соответственно амплитуда сигнала $U_0$ равна

$$U_0 = SkL\Delta\beta. \qquad (3)$$

С учетом (1) это уравнение принимает вид

$$U_0 = -SkL\frac{\Delta p_a}{\sigma}\left[y - \frac{\varphi_0\left(d^2 - y^2\right)}{4\sigma}P\right].$$

Таким образом, амплитуда сигнала фотоприемника $U_0$ пропорциональна величине ВГД ($P$).

Очевидно, что максимальное значение амплитуда сигнала примет при максимальном значении $k$, т.е. при положении щелевой диафрагмы на участке наибольшего спада распределения интенсивности света $\Phi(Z)$ (рис. 2). Для этого диафрагма и фотоприемник устанавливаются с возможностью перемещения в плоскости, перпендикулярной направлению распространения отраженного от роговицы луча света. Следовательно, по амплитуде сигнала фотоприемника $U_0$, соответствующей амплитуде угловых колебаний отраженного роговицей пучка света, можно судить о величине ВГД.

### Схема измерения ВГД

Примером возможной практической реализации рассмотренной оптико-электронной методики измерения ВГД может служить схема, изображенная на рис. 3. Центр поверхности роговицы глаза освещается узким пучком света от источника 1, направленным под углом $\varphi_0$ к оптической оси глаза. Периодическое пневматическое воздействие на роговицу глаза осуществляется с помощью устройства, выполненного в виде сужающегося полого канала 5, выходное окно которого расположено вблизи роговицы, а входное окно совмещено с плоскостью диффузора низкочастотного акустического динамика 6, установленного в корпусе 7 и соединенного с генератором низкочастотных сигналов 8. Перемещением диафрагмы 2 и фотоприемника 3 перпендикулярно направлению распространения отраженного от роговицы пучка можно добиться получения максимального значения амплитуды регистрируемого сигнала. С помощью регистрирующего устройства 4 измеряется значение амплитуд полученного сигнала при действии периодического пневматического воздействия на роговицу глаза. Измеренные значения пропорциональны амплитудам угловых колебаний $\Delta\beta$, отраженного от роговицы света (3). По предварительно построенной градуировочной кривой и среднему значению амплитуды измеренных сигналов можно определить искомое значение ВГД.

Таким образом, процедура измерения ВГД безопасна для глаза, так как пневматическое воздействие значительно слабее известных примеров [1–4], а сами измерения точнее, поскольку величина ВГД определяется по большому числу значений измеренных амплитуд электрического сигнала фотоприемника. При частоте пневматического воздействия, равной 40 Гц, и измерении 50 значений ВГД требуется 1,25 секунды.

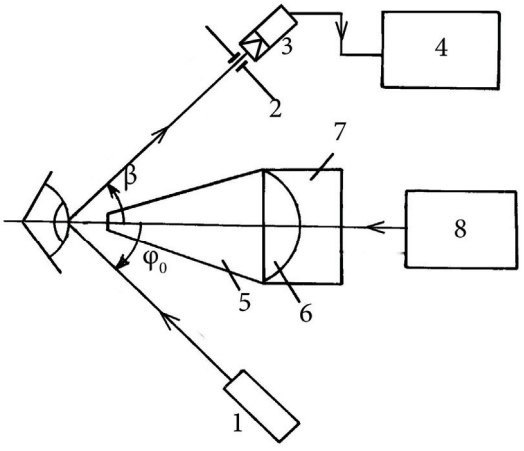



Рис. 3. Функциональная схема измерения ВГД

## Заключение

В настоящей работе рассмотрена оптико-электронная методика обработки светового сигнала, отраженного от роговицы глаза, при использовании бесконтактного способа измерения ВГД. При этом глаз подвергается периодическому пневматическому внешнему воздействию, что приводит к периодической деформации роговицы и соответствующему изменению угла отражения зондирующего луча. Показано, что переменная составляющая сигнала на выходе фотоприемника, соответствующая амплитуде угловых колебаний отраженного роговицей пучка света, будет пропорциональна величине ВГД, а максимальное значение амплитуды этого сигнала соответствует оптимальному положению щелевой диафрагмы на участке наибольшего спада распределения интенсивности света.

## Литература

1. Jorge J., Gonzales-Meijome J.M., Diaz-Rey J.A. et al. Clinical performance of non-contact tonometry by Reichert AT 550 in glaucomatous patients // Ophtalmic and Phusiological Optics. – 2003. – V. 23. – № 6. – P. 503–506.
2. Voshita T., Kobajashi A., Takahashi M. et al. Intraocular pressure by non-contact tonometry over an amniotic membrane patch in humans // American Journal of Ophthalmology. – 2006. – V. 141. – № 3. – P. 508 – 511.
3. Stamper M., Robert l. A history of intraocular pressure and its measurement // Optometry and Vision Science. (The Journal of the American Academy of Optometry). – 2011. – V. 88. – № 1. – P. E16–E28.
4. Liang S.Y., Lee G.A., Shields D. Self-tonometry in glaucoma measurement – past, present and future // Survey of Ophthalmology. – 2009. – V. 54. – № 4. – P. 450–462.
5. Patent 7481767 USA. Method and apparatus for determining true intraocular pressure / M. Luce, A. David. January 27, 2009.
6. Патент 2067845 РФ. Бесконтактный способ измерения внутриглазного давления и бесконтактный тонометр / В.А. Трофимов, А.Л. Дмитриев, Ю.Т. Нагибин, В.Т. Прокопенко, В.В. Сальников // Бюлл. Открытия, изобретения. – 1996. – № 29.

***Кузнецов Константин Юрьевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ckyznetsov@gmail.com

***Нагибин Юрий Тихонович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, nagibin77@mail.ru

***Трофимов Владимир Анатольевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, troftu@mail.ru

***Алексеев Сергей Андреевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, asast@mail.ru

# 2 ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА

**УДК 532.22**

## РЕЛЕЙ-ТЕЙЛОРОВСКАЯ НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЗАПЫЛЕННОГО ГАЗА

**Р.С. Савельев, Н.Н. Розанов, Г.Б. Сочилин, С.А. Чивилихин**

Исследована неустойчивость границы раздела в системе «газ+пыль». Получено решение дисперсионного уравнения, связывающего волновые числа возмущений со скоростью их развития во времени. Показано, что уменьшение плотности пыли, как и увеличение размера пылинок, уменьшает скорость развития неустойчивости. Показано, что вязкость газа уменьшает скорость роста возмущений с большими волновыми числами.
**Ключевые слова:** неустойчивость Релея–Тейлора, седиментация, дисперсионное уравнение, вязкость.

### Введение

Задача о неустойчивости границы раздела двух жидкостей, имеющих разные плотности, в поле сил тяжести, впервые была рассмотрена Тейлором [1], а позже Беллманом и Пеннингтоном [2], которые учли дополнительно такие факторы, как вязкость и поверхностное натяжение. Неустойчивость возникает в случае, когда жидкость, находящаяся сверху, имеет бóльшую плотность. Помимо гидро- и газодинамики, релей-тейлоровская неустойчивость наблюдается также в широком круге задач астрофизики, физики плазмы, электро- и магнитогидродинамики [3, 4] и наногидродинамики [5].

В настоящей работе исследуется задача о неустойчивости границы раздела в системе «газ + пыль», находящейся в поле силы тяжести. Как показывают некоторые экспериментальные и теоретические данные, в процессе седиментации, на границе раздела «чистой» жидкости (газа) и дисперсной системы, возникает неустойчивость, аналогичная релей-тейлоровской [6–8].

В работе [6] было исследовано развитие во времени границы раздела глицерина и суспензии – частиц песка, распределенных в глицерине. Экспериментальные данные показали наличие в исследуемой системе неустойчивости, подобной релей-тейлоровской. Пространственный Фурье-спектр границы раздела показал ограниченность показателя роста начальных возмущений и существование моды с максимальным показателем роста. Для теоретического описания была применена модель однородной жидкости с плотностью и вязкостью как функций вертикальной координаты. В работах [7, 8] были проведены соответственно двухмерное и трехмерное моделирования вышеуказанного явления. Рассматриваемая система была ограничена сбоку стенками. Конечное количество членов в ряде Фурье дает приближенное решение с точностью до характерного размера сглаживания.

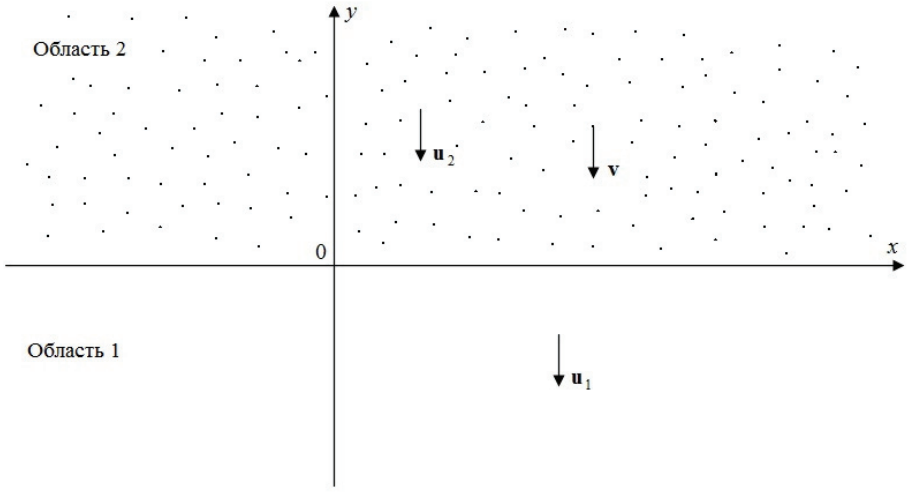



Рис. 1. Схема задачи. Сила тяжести направлена в отрицательном направлении оси $y$. В области 1 ($y < 0$) находится газ, его скорость $\mathbf{u}_1$, в области 2 – пыль (скорость $\mathbf{v}$) и газ (скорость $\mathbf{u}_2$)

В работе будем рассматривать модель не ограниченной в горизонтальном направлении системы двух взаимодействующих сред – газа и пыли. Считаем, что верхнее полупространство занято пылью и газом, нижнее – только газом (рис. 1). Начало координат находится на нижней границе области с пылью. Размеры частиц пыли считаются пренебрежимо малыми, что позволяет рассматривать массу пыли как сплошную среду, описывающуюся уравнениями Эйлера и неразрывности. В такой постановке задача

становится схожей с задачей о неустойчивости Релея–Тейлора, в которой дестабилизация границы раздела неизбежна. Целью работы будет доказательство возникновения неустойчивости и отыскание дисперсионного уравнения, связывающего волновые числа возмущений со скоростью их развития во времени.

### Основные уравнения

Основными уравнениями, описывающими движение жидкости (газа) являются уравнение Навье–Стокса и уравнение неразрывности [9]. Пыль, «падающая» в газе, рассматривается как сжимаемая сплошная среда, для которой выполняются уравнения Эйлера и неразрывности [9]. Будем полагать, что газ несжимаем, а частицы пыли не взаимодействуют между собой (их концентрация невелика). Если считать частицы пыли одинаковыми шарами, имеющими малые, но конечные размеры, а скорость пыли относительно газа достаточно малой, то сила трения, действующая на «элемент объема» пыли, равна

$$\mathbf{F} = \alpha\rho_1(\mathbf{u}_2 - \mathbf{v}), \tag{1}$$

где $\rho_1$ – плотность пылинок (концентрация пылинок, умноженная на массу одной пылинки); $\alpha = \frac{9}{2}\frac{\eta}{r^2\rho_d}$ – параметр; $r$ – радиус пылинки; $\eta$ – вязкость жидкости; $\rho_d$ – плотность вещества пыли. Эта сила действует также со стороны частиц пыли на газ и поэтому должна быть добавлена в соответствующие уравнения для газа и для пыли. Уравнения, описывающие данную систему, выглядят тогда следующим образом:

$$\begin{aligned}
&\left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v}\right)\rho_1 = \rho_1\mathbf{g} + \rho_1\alpha(\mathbf{u}_2 - \mathbf{v}),\\
&\frac{\partial \rho_1}{\partial t} + \nabla\cdot(\rho_1\mathbf{v}) = 0;\\
&\left(\frac{\partial \mathbf{u}_2}{\partial t} + (\mathbf{u}_2\nabla)\mathbf{u}_2\right)\rho = \rho\mathbf{g} + \rho_1\alpha(\mathbf{v} - \mathbf{u}_2) - \nabla p_2 + \eta\Delta\mathbf{u}_2,\\
&\left(\frac{\partial \mathbf{u}_1}{\partial t} + (\mathbf{u}_1\nabla)\mathbf{u}_1\right)\rho = \rho\mathbf{g} - \nabla p_1 + \eta\Delta\mathbf{u}_1,\\
&\nabla\cdot\mathbf{u}_2 = 0,\ \nabla\cdot\mathbf{u}_1 = 0,
\end{aligned} \tag{2}$$

где $\rho$ – плотность газа; $p_1$ – давление газа в области без пыли и $p_2$ – давление газа в области с пылью; $g$ – ускорение свободного падения.

### Стационарное движение

Начнем с рассмотрения стационарного движения (падение пылинок и газа с постоянной скоростью). Полагая равными нулю все производные всех фигурирующих в (2) величин по времени (частные производные скорости пыли по координатам также равны нулю), находим однородные решения для скорости и плотности пыли:

$$\mathbf{v} = \mathbf{u}_2 + \frac{\mathbf{g}}{\alpha},$$
$$\nabla\cdot(\rho_1\mathbf{v}) = \rho_1(\nabla\mathbf{v}) + (\mathbf{v}\nabla)\rho_1 = \rho_1(\nabla\mathbf{u}_2) + (\mathbf{v}\nabla)\rho_1 = (\mathbf{v}\nabla)\rho_1 = 0.$$

Из последнего соотношения следует, что плотность пыли постоянна во всей области, $\rho_1 = \text{const}$. Перейдем в систему отсчета, в которой $\mathbf{v} = 0$. Стационарные решения тогда выглядят следующим образом:

$$\begin{aligned}
&\mathbf{u}_1 = \mathbf{u}_2 = -\frac{\mathbf{g}}{\alpha},\\
&p_2 = -(\rho + \rho_1)gy + p_0,\\
&p_1 = -\rho gy + p_0,\\
&p_0 = p_1\big|_{y=0} = p_2\big|_{y=0}.
\end{aligned} \tag{3}$$

Основной задачей работы является линейный анализ устойчивости этого решения.

### Линеаризация уравнений

Исследуем устойчивость стационарного решения (3) по отношению к малым возмущениям. Невозмущенные величины будем помечать нижним индексом 0, а малые возмущения – штрихами. Возмущения границы раздела зададим функцией $h(x,t)$, значения которой также малы. Пренебрегая величинами второго порядка малости, получим следующую систему линейных дифференциальных уравнений:

$$\frac{\partial \mathbf{v}'}{\partial t} = \alpha(\mathbf{u}_2' - \mathbf{v}'),$$
$$\frac{\partial \rho_1'}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_1 \mathbf{v}') = 0;$$
$$\left(\frac{\partial \mathbf{u}_2'}{\partial t} + \frac{g}{\alpha}\frac{\partial \mathbf{u}_2'}{\partial y}\right)\rho = \rho_1 \alpha(\mathbf{v}' - \mathbf{u}_2') - \nabla p_2' + \eta \Delta \mathbf{u}_2', \quad (4)$$
$$\left(\frac{\partial \mathbf{u}_1'}{\partial t} + \frac{g}{\alpha}\frac{\partial \mathbf{u}_1'}{\partial y}\right)\rho = -\nabla p_1' + \eta \Delta \mathbf{u}_1',$$
$$\nabla \cdot \mathbf{u}_2' = 0, \ \nabla \cdot \mathbf{u}_1' = 0.$$

Из-за малости функции $h(x,t)$, можно пренебречь изменениями переменных на границе раздела как величинами второго порядка малости. Учитывая также, что

$$(p_2 - p_1)\big|_{y=h(x,t)} = (p_2' - p_1')\big|_{y=h(x,t)} - \rho_1 g h(x,t),$$

условия на границе раздела можно записать в следующем виде:

$$\mathbf{u_1'}\big|_{y=0} = \mathbf{u_2'}\big|_{y=0},$$
$$v_y\big|_{y=0} = \frac{\partial h(x,t)}{\partial t},$$
$$\left(-p_1' + 2\eta\frac{\partial u_{1y}'}{\partial y}\right)\Bigg|_{y=0} = \left(-p_2' + 2\eta\frac{\partial u_{2y}'}{\partial y}\right)\Bigg|_{y=0} + \rho_1 g h(x,t), \quad (5)$$
$$\left(\frac{\partial u_{1y}'}{\partial y} + \frac{\partial u_{1x}'}{\partial y}\right)\Bigg|_{y=0} = \left(\frac{\partial u_{2y}'}{\partial y} + \frac{\partial u_{2x}'}{\partial y}\right)\Bigg|_{y=0}.$$

**Решение линеаризированной системы**

Общее решение системы (4) может быть представлено в виде суммы частных решений, экспоненциально зависящих от времени ($\sim e^{\gamma_i t}$, где $\gamma_i$ – комплексные инкременты). Решая систему из первых двух уравнений для пыли, получаем:

$$\mathbf{v}' = \frac{\alpha}{\gamma + \alpha}\mathbf{u_2'}, \ \rho_1' = \text{const}.$$

Ввиду однородности задачи по координате *x* переменные, характеризующие газ, можно представить в виде интеграла Фурье:

$$f'(x,y) = \int_{-\infty}^{\infty} f_k'(y) e^{ikx} dk,$$

где *k* – волновое число возмущения. Далее будем рассматривать только случай неустойчивых решений ($\mathrm{Re}(\gamma) > 0$). Тогда, применяя к решениям системы (4) граничные условия (5) и учитывая ограниченность возмущений по оси *y*, можно записать дисперсионное уравнение, связывающее комплексный инкремент $\gamma$ с волновым числом возмущения $k$, в виде определителя четвертого порядка, приравненного нулю:

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 \\ k_1 & |k| & |k| & -k_2 \\ -\dfrac{\alpha\rho_1 g}{\gamma(\gamma+\alpha)} & \left(\dfrac{\rho\gamma}{|k|} + \dfrac{\rho g}{\alpha} - \dfrac{\alpha\rho_1 g}{\gamma(\gamma+\alpha)}\right) & \left(\dfrac{\rho\gamma}{|k|} + \dfrac{\alpha\rho_1\gamma}{|k|(\gamma+\alpha)} - \dfrac{\rho g}{\alpha}\right) & 0 \\ k^2 - k_1^2 & 0 & 0 & k_2^2 - k^2 \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

где $k_1 = \dfrac{\rho g}{2\alpha\eta} + \sqrt{\left(\dfrac{\rho g}{2\alpha\eta}\right)^2 + k^2 + \dfrac{\rho\gamma}{\eta}}$, $k_2 = \dfrac{\rho g}{2\alpha\eta} - \sqrt{\left(\dfrac{\rho g}{2\alpha\eta}\right)^2 + k^2 + \dfrac{\rho\gamma}{\eta} + \dfrac{\alpha\rho_1\gamma}{\eta(\gamma+\alpha)}}$.

В частном случае отсутствия вязкости газа (но при сохранении трения между пылинками и газом) дисперсионное уравнение будет выглядеть следующим образом:

$$\gamma^3 + \gamma^2\left(\alpha\left(1 + \frac{\rho_1}{2\rho}\right) + \frac{|k|g}{\alpha}\right) + \gamma|k|g - \frac{\rho_1|k|g\alpha}{2\rho} = 0. \quad (7)$$

**Анализ дисперсионного уравнения**

Пренебрегая малыми членами в (12), можно найти асимптотические решения:

при $|k| >> \frac{\rho_1 g}{4\alpha\eta}$ $\gamma = \frac{\rho_1 g}{4|k|\eta}$,

при $|k| << \frac{\rho g}{2\alpha\eta}$ для больших $\eta$ и $|k| << \frac{\alpha^2(2\rho+\rho_1)}{2\rho g}$ для малых $\gamma = \sqrt{\frac{|k|\rho_1 g}{(2\rho+\rho_1)}}$. (8)

Дисперсионное соотношение $\gamma(k)$ в (8) совпадает с соотношением для классической неустойчивости Рэлея-Тейлора с жидкостями с плотностями $\rho$ и $\rho+\rho_1$.

Из асимптотических решений следует, что при некотором волновом числе возмущения $k$ существует максимум. Иначе говоря, при определенных параметрах на границе раздела будет образовываться периодическая структура с периодом, обратно пропорциональным $k$.

Численное решение уравнения (6) показывает, что при каждом $k$ существует только одно решение, вещественная часть которого положительна. При этом значение $\gamma$ является действительным, так что временное развитие возмущений апериодическое. Анализ уравнения (7) показывает, что и в случае невязкого газа существует единственное действительное положительное решение. Асимптотическое решение для малых $k$ совпадает с (8), а для больших выглядит следующим образом:

при $|k| >> \frac{\alpha^2(2\rho+\rho_1)}{2\rho g}$ $\gamma = \frac{\alpha}{2}\left(\sqrt{1+\frac{2\rho_1}{\rho}}-1\right)$.

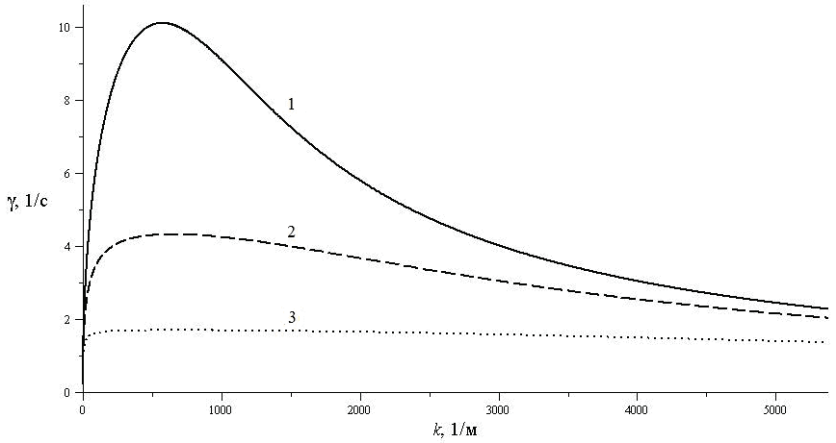



Рис. 2. Графики зависимости инкремента возмущений $\gamma$ от волнового числа $k$ при $\rho = 1$ кг/м$^3$, $\rho_1 = 0{,}1$ кг/м$^3$, $\eta = 2\cdot10^{-5}$ кг/(м·с), $\rho_d = 1000$ кг/м$^3$: 1 – при $r = 10^{-6}$ м; 2 – при $r = 3\cdot10^{-5}$ м; 3 – при $r = 5\cdot10^{-6}$ м

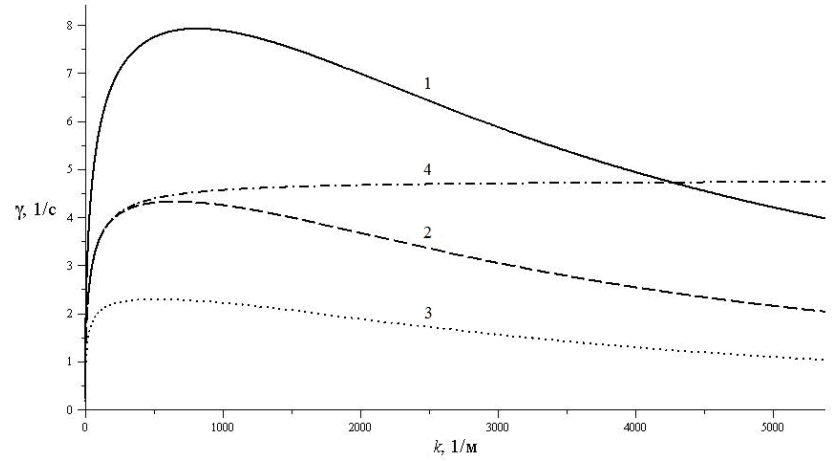



Рис. 3. Графики зависимости инкремента роста возмущений $\gamma$ от волнового числа $k$ при $\rho = 1$ кг/м$^3$, $r = 3\cdot10^{-5}$ м, $\eta = 2\cdot10^{-5}$ кг/(м·с), $\rho_d = 1000$ кг/м$^3$; в случае вязкого газа: 1 – при $\rho_1 = 0{,}2$ кг/м$^3$; 2 – при $\rho_1 = 0{,}1$ кг/м$^3$; 3 – при $\rho_1 = 0{,}05$ кг/м$^3$; в случае невязкого газа: 4 – при $\rho_1 = 0{,}1$ кг/м$^3$

На рис. 2 и 3 представлены графики зависимости инкремента возмущений $\gamma$ от волнового числа $k$ для различных значений радиусов пылинок и плотности пыли соответственно. На кривой 4 (рис. 3) также показана зависимость $\gamma$ от $k$ при отсутствии вязкости у газа. В случае как вязкого, так и невязкого газа возрастающие возмущения имеются для любых частот, но с учетом вязкости показатель роста возмущений $\gamma$ спадает к нулю при $k \to \infty$. Таким образом, вязкость оказывает некоторый стабилизирующий эффект.

При увеличении радиуса пылинок $r$, также как и при уменьшении плотности пыли $\rho_1$, сила трения, действующая на «элемент объема», согласно (1), уменьшается. Соответственно, наличие пыли в газе оказывает все меньшее влияние на неустойчивость системы, что видно из рис. 2 и 3.

**Заключение**

Исследование устойчивости рассматриваемой двухфазной системы по отношению к малым возмущениям выявило наличие неустойчивости границы между запыленным и чистым газом. Анализ дисперсионного соотношения (6) показал, что инкремент роста возмущений $\gamma$ при некотором волновом числе $k$ достигает максимума. Помимо этого, было показано, что вязкость газа уменьшает скорость роста возмущений с большими волновыми числами, т.е. $\gamma \to 0$ при $k \to \infty$, тогда как в приближение невязкого газа $\gamma$ принимает некоторое положительное значение при $k \to \infty$.

Работа выполнена при поддержке гранта Минобрнауки РФ РНП 2.1.1/9824.

**Литература**

1. Taylor G.I. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes // Proc. Roy. Soc. A. – 1950. – V. 201. – P. 192–196.
2. Bellman R., Pennington R. Effects of surface tension and viscosity on Taylor instability // Quart. Appl. Math. – 1954. – V. 12. – P. 151–162.
3. Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability. – NY.: Dover, 1981. – 652 p.
4. Sharp D.H. An overview of Rayleigh–Taylor instability // Physica D. – 1984. – V. 12. – P. 3–18.
5. Kadau K. et. al. Nanohydrodynamics Simulations: An Atomic View of the Rayleigh-Taylor Instability // Proc. Nat. Acad. Sci. – 2004. – V. 101 (16). – P. 5851–5855.
6. Völtz C., Pesch W. and I. Rehberg. Rayleigh-Taylor instability in a sedimenting suspension // Phys. Rev. E. – 2001. – V. 65. – P. 1–7.
7. Glowinski R., Pan T.W. and Joseph D.D. Modelling Rayleigh-Taylor instability of a sedimenting suspension of several thousand circular particles in direct numerical simulation // J. Fluid Mech. – 2001. – V. 434. – P. 23–37.
8. Guda S., Bukharina S., Mucha P.J. Rayleigh-Taylor Instability in Sedimentation [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://rtg.amath.unc.edu/Guda-ChaCha06.pdf, своб.
9. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. – М.: Наука, 1988. – Т. VI. – 736 с.

***Савельев Роман Сергеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, savelyev.r.s@gmail.com

***Розанов Николай Николаевич*** – НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова», доктор физ.-мат. наук, начальник отдела, nrosanov@yahoo.com

***Сочилин Георгий Борисович*** – НПК «ГОИ им. С.И. Вавилова», кандидат физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, goga.ilph@yahoo.com

***Чивилихин Сергей Анатольевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат физ.-мат. наук, доцент, sergey.chivilikhin@gmail.com

**УДК 535.372; 535.33**

# НИЗКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ АП-КОНВЕРСИОННОЙ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ В НАНОСТРУКТУРИРОВАННЫХ АКТИВИРОВАННЫХ СТЕКЛОКЕРАМИКАХ

**В.А. Асеев, Е.В. Колобкова, Я.А. Некрасова**

Исследованы люминесцентные свойства свинцовофторосиликатных наноструктурированных стеклокерамик, активированных ионами иттербия и эрбия. Проведены измерения спектров люминесценции в видимом и ближнем ИК диапазоне при комнатной температуре (300 К) и температуре жидкого азота (77 К) при накачке на длине волны 975 нм. Построены зависимости спектров люминесценции исследуемых стеклокерамик от времени их вторичной термообработки и температуры образца.

**Ключевые слова:** люминесцентные свойства, редкоземельные ионы, низкие температуры.

### Введение

В настоящее время большое внимание уделяется разработке люминофоров для создания энергоэффективных источников белого света. Одним из перспективных материалов для таких люминофоров являются материалы, активированные эрбием. Для наиболее эффективного свечения в видимой области необходимо применять матрицы с низкофононным спектром, например, бескислородные среды (халькогенидные или галогенидные материалы). Однако синтез таких сред сложен и дорог. Требуются специальные меры, которые предотвращают взаимодействие материала с окружающей атмосферой в процессе синтеза.

Сегодня более простым и дешевым способом является синтез оксифторидных стеклокерамик, в которых выделяется низкофононная нанокристаллическая фаза, включающая в себя ионы редких земель (например, эрбия, иттербия, и т.д.). Данный материал сочетает в себе свойства стекла и кристалла и имеет ряд достоинств: возможность прессования, создания образцов больших размеров, вытяжки волокна, а также возможность проведения ионного обмена для создания волноводных структур. Однако для получения заданных свойств необходимо оптимизировать параметры стеклокерамик по размеру и объему кристаллической фазы, которые, в свою очередь, зависят от длительности вторичной термообработки (т.е. термообработки, при которой наблюдается спонтанный рост кристаллической фазы в матрице стекла). Целью работы являлось исследование люминесцентных свойств наноструктурированной оксифторидной стеклокерамики, активированной ионами иттербия и эрбия, при комнатной температуре (300 К) и температуре жидкого азота (77 К). В задачи исследования входило изучение зависимости спектров люминесценции от времени термообработки и температуры образца.

### Описание эксперимента

В работе исследовались образцы следующего состава: $30SiO_2$-$18PbF_2$-$7.5Al_2O_3$-$5ZnF_2$-$29CdF_2$-$3YF_3$. Концентрация ионов иттербия составляла 3 мол%, концентрация $ErF_3$ изменялась от 0,05 до 0,5 мол%. Определены температуры стеклования и начала первого пика кристаллизации. Эти данные использовались для выбора температур вторичной термообработки. Термообработка проводилась при температуре 515°C, время вторичной термообработки варьировалось от 30 до 600 мин. Данные рентгенофазового анализа позволяют сделать следующие выводы: при термообработке свинцовооксифторидных стекол, содержащих оксиды иттрия и лантаноидов, в том числе и при совместном введении различных лантаноидов и иттрия, выделяется кристаллическая фаза – кубическая, гранецентрированная, пространственная группа Fm3m. Размеры элементарной ячейки в случае фторида эрбия составляют 5,725 Å и в случае фторида иттербия – 5,7 Å. Объем кристаллических фаз определяется количеством введенных фторидов лантаноидов или лантаноидов и иттрия. Выделяющиеся в виде наноразмерных кристаллов фазы являются кристаллическими фазами ряда новых соединений – лантаноидных оксифторидов свинца $PbLnOF_3$. В зависимости от времени термообработки размер выделяющейся кристаллической фазы составил от 16 нм (2 ч) до 40 нм (10 ч). По данным рентгенофазового анализа сделан вывод о том, что ионы редкоземельных элементов играют роль центров нуклеации при росте свинцово-фторидной кристаллической фазы. Эрбий и иттербий входят в кристаллическую фазу, образуя соединение состава $PbY_xEr_{1-x}OF_3$, $PbY_xYb_{1-x}OF_3$ , а при их совместном введении – $PbY_xEr_yYb_{1-x-y}OF_3$.

Измерения спектров люминесценции проводились в диапазонах длин волн 350–700 нм и 1400–1650 нм с шагом 0,1 нм при температурах 300 и 77 К. Схема установки для измерений спектров люминесценции представлена на рис. 1.

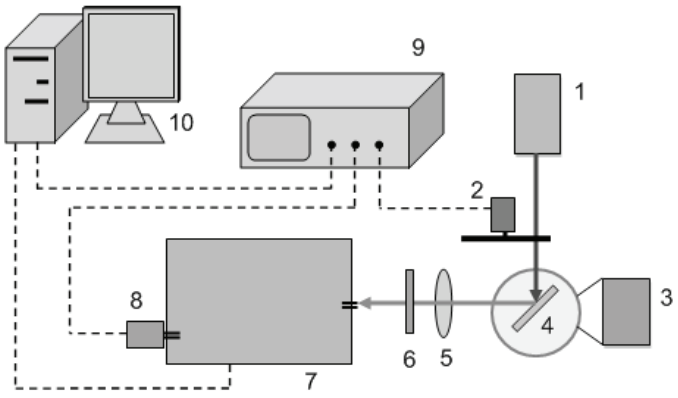



Рис. 1. Схема установки для регистрации спектров люминесценции: 1 – полупроводниковый лазер; 2 – модулятор; 3 – криостат; 4 – образец; 5 – линза; 6 – спектральный фильтр; 7 – монохроматор; 8 – приемник; 9 – синхронизируемый усилитель SR 850 DSP; 10 – компьютер

Возбуждение люминесценции осуществлялось с помощью диодного лазера 1 (975 нм). Излучение лазера после прохождения через модулятор 2 попадало на образец 4, который при низкотемпературных измерениях опускался в криостат с жидким азотом 3, полученное излучение попадало на собирающую линзу 5 и далее, проходя через спектральный фильтр 6, фокусировалось на входной щели монохроматора 7 и регистрировалось на приемнике 8. Сигнал от приемника усиливался при помощи цифрового синхронного усилителя 9 (модель SR 850 DSP) и обрабатывался на компьютере 10. Спектры люминесценции были нормированы на единицу по пику в красной области спектра ~ 650–670 нм.

**Результаты и обсуждения**

Проведем сравнение спектров люминесценции стекла и керамики при комнатной температуре (рис. 2). Как видно из рисунка, при комнатной температуре в спектре стеклокерамики наблюдаются 6 пиков люминесценции. Эти пики соответствуют следующим переходам: $^4G_{9/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$ (380 нм), $^2H_{9/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$ (415 нм), $^4F_{5/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$ (475 нм), $^2H_{11/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$ (520 нм), $^4S_{3/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$ (550 нм), $^4F_{9/2}\rightarrow{}^4I_{15/2}$ (670 нм). Однако в спектре стекла наблюдается только 5 пиков в видимом диапазоне, полоса в УФ части отсутствует. Переходы в красной и зеленой области спектра получаются при сложении двух фотонов накачки, а в синей – трех. Исходя из полученных графиков, можно сказать о том, что при термообработке происходит увеличение интенсивности пика люминесценции на 415 нм, в то же время люминесценция во всем остальном исследуемом спектральном диапазоне 450–575 нм будет уменьшаться относительно нормировочного пика.

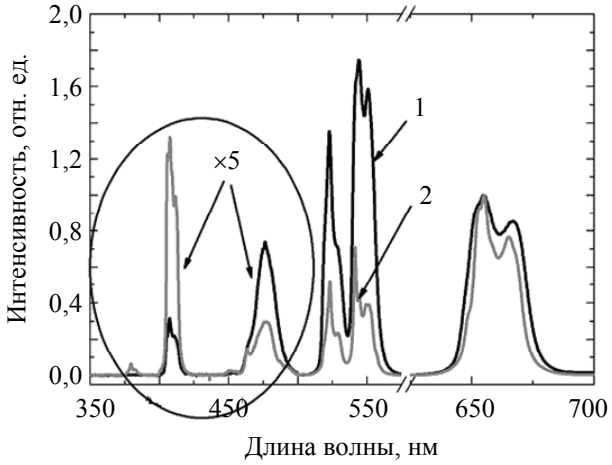



Рис. 2. Спектры люминесценции стекла (1) и стеклокерамики (2) ($T_{изм}$= 300 К)

Рассмотрим влияние времени термообработки на спектры люминесценции образцов (рис. 3). Из [1, 2] известно, что изменение времени термообработки приводит к изменению размеров кристаллической фазы. При увеличении времени термообработки, а, следовательно, и размера кристаллической фазы, наблюдается увеличение относительной интенсивности в области 375–575 нм. Аналогичное поведение спектров будет наблюдаться при измерениях в условиях низких температур (рис. 4).

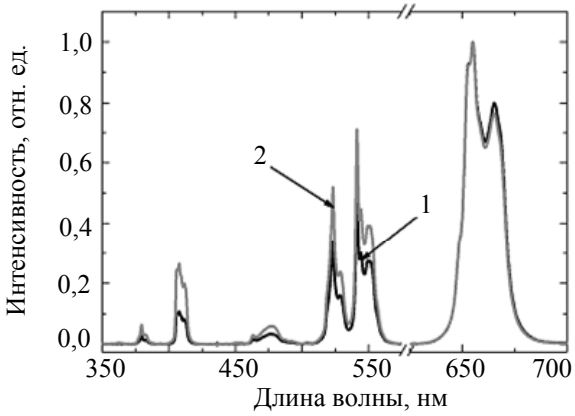



Рис. 3. Влияние времени термообработки на спектры люминесценции ($T_{изм}$= 300 К):
(1) – время термообработки 120 мин; (2) – время термообработки 600 мин

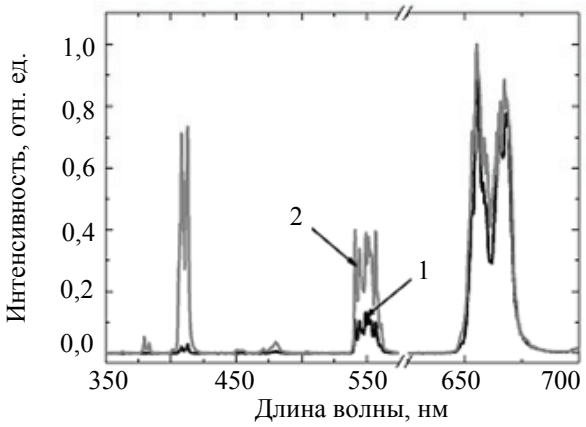



Рис. 4. Влияние времени термообработки на спектры люминесценции ($T_{изм}$= 77 К):
(1) – время термообработки 120 мин; (2) – время термообработки 600 мин

Влияние температуры образца на форму спектров люминесценции иттербий-эрбиевой наностеклокерамики представлено на рис. 5. Надо отметить, что при комнатной температуре в видимой области в спектрах присутствуют полосы люминесценции на 520 и 550 нм, соответствующие переходам $^2H_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ и $^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ соответственно (рис. 5, а). При температуре 77 К пик на 520 нм отсутствует. Это связано с тем, что не происходит температурное перераспределение между уровнями $^2H_{11/2}$ и $^4S_{3/2}$. Более наглядно сужение спектров люминесценции проявляется на пиках в районе 1,5 мкм (рис. 5, б). Это проявляется также и в видимой области на примере полосы $^4S_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ (рис. 6).

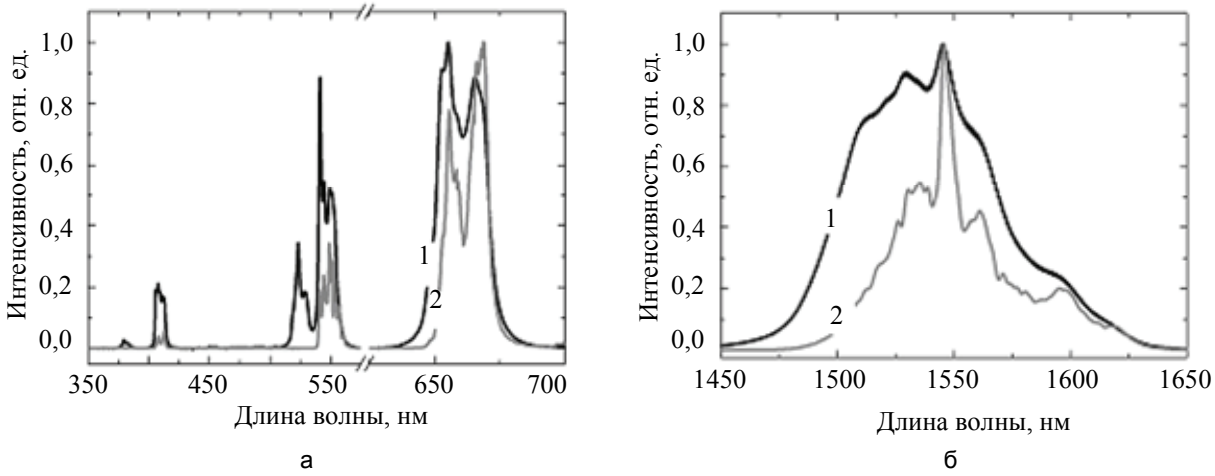



Рис. 5. Влияние температуры образца на спектры люминесценции в разных спектральных диапазонах (а, б):
(1) – при 300 К; (2) – при 77 К (концентрация $ErF_3$ – 0,5 мол%)

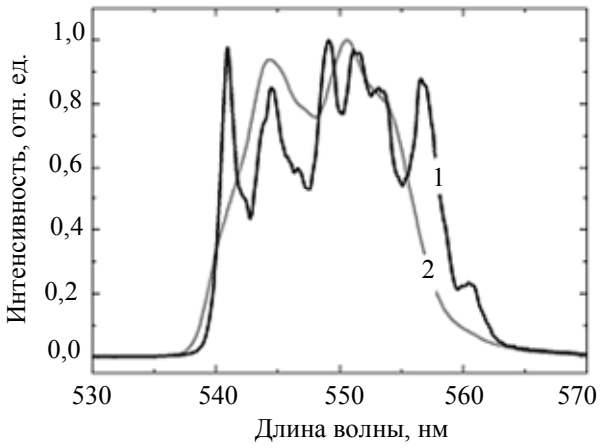



Рис. 6. Спектры люминесценции стекла (1) и стеклокерамики (2) ($T_{изм}$= 77 К)

Сравнение формы спектров показывает, что в стеклокерамике три дополнительных пика и штарковские подуровни проявляются более четко, чем в стекле. Причиной такого поведения спектров при вторичной термообработке является вхождение ионов эрбия в кристаллическую фазу.

### Заключение

В ходе работы были исследованы люминесцентные свойства наноструктурированной стеклокерамики, активированной ионами иттербия и эрбия, при комнатной температуре (300 К) и температуре жидкого азота (77 К). Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

- наблюдается интенсивная ап-конверсионная люминесценция в синей (415 нм), зеленой (475, 520 и 550 нм) и красной (~670 нм) области спектра;
- длительная термообработка приводит к выравниванию относительных интенсивностей полос в синей, зеленой и красной области спектра;
- при низкой температуре проявляется штарковская структура полос люминесценции.

Наличие полос люминесценции в видимой и УФ области спектра позволяет говорить о том, что полученные иттербий-эрбиевые наностеклокерамики могут быть использованы в качестве люминофоров для диодных энергоэффективных источников белого света.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (контракт П412 12.05.2010, Минобрнауки РФ), а также в рамках гранта РФФИ №10-08-90036-Бел_а.

### Литература

1. Асеев В.А., Голубков В.В., Клементьева А.В., Колобкова Е.В., Никоноров Н.В. Спектрально-люминесцентные свойства прозрачной свинцовофторидной наностеклокерамики, активированной ионами эрбия // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106. – № 5. – С .770–775.
2. Gouveia-Neto A.S., da Costa E.B., Bueno L.A., Ribeiro S.J.L. Red, green and blue upconversion luminescence in ytterbium-sensitized praseodymium-doped lead–cadmium–germanate glass // Optical Materials. – 2004. – V. 26. – P. 271–274.

***Асеев Владимир Анатольевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, ассистент, Aseev@oi.ifmo.ru

***Колобкова Елена Вячеславовна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, Kolobok106@rambler.ru

***Некрасова Яна Андреевна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, Nekrasova@oi.ifmo.ru

**УДК 535**

## НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЙ ОТКЛИК КАЛИЕВО-АЛЮМОБОРАТНЫХ СТЕКОЛ С НАНОКРИСТАЛЛАМИ ГАЛОГЕНИДОВ МЕДИ

**А.А. Ким, Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, В.А. Цехомский**

Представлены результаты экспериментального исследования нелинейно-оптических свойств калиево-алюмоборатных стекол с нанокристаллами CuCl и CuBr в наносекундном диапазоне на длине волны 532 нм. Показано, что нелинейно-оптический отклик проявляется в виде ограничения излучения, имеет пороговый характер и происходит в двух интервалах энергий лазерных импульсов: $10^{-10}$–$10^{-8}$ Дж и $10^{-4}$–$10^{-2}$ Дж. Проведено сравнение нелинейных характеристик стекол с нанокристаллами CuCl и CuBr и предложены модели, объясняющие наблюдаемые эффекты.

**Ключевые слова:** калиево-алюмоборатное стекло, нанокристалл, хлорид меди, бромид меди, нелинейно-оптический отклик.

### Введение

Нелинейно-оптические свойства кристаллов галогенидов меди являются объектом пристального изучения на протяжении десятилетий [1]. Как правило, такие исследования проводятся в полосе экситонного поглощения при криогенных температурах. В то же время, как показали недавние эксперименты, в стеклах с нанокристаллами CuCl наблюдается низкопороговый нелинейно-оптический отклик в нано- и пикосекундном диапазонах при комнатной температуре [2]. В работах [1–3] исследовались стекла ФХС-7, обладающие «медленным» фотохромным эффектом [3], который может накладываться на «быстрый» нелинейно-оптический отклик и вносить искажения в интерпретацию результатов. Кроме того, для практических применений требуются низкопороговые нелинейно-оптические среды с высоким быстродействием и не обладающие «медленным» фотохромизмом.

В СПбГУ ИТМО на кафедре ОТиМ были впервые синтезированы стекла на калиево-алюмоборатной (КАБ) основе с нанокристаллами галогенидов меди, которые не обладают фотохромным

эффектом, но, в то же время, имеют ярко выраженную оптическую нелинейность [4]. Целью работы является экспериментальное исследование нелинейно-оптических свойств КАБ стекол с нанокристаллами CuCl и CuBr, сопоставление их характеристик и анализ механизмов возникновения нелинейно-оптического отклика.

### Методика экспериментов

Для проведения экспериментов были синтезированы КАБ стекла следующих составов: (а) $20K_2O$-$25Al_2O_3$-$55B_2O_3$ с добавками 8% NaBr, 2% $Cu_2O$, $SnO_2$, $Sb_2O_3$; и (б) $20K_2O$-$25Al_2O_3$-$55B_2O_3$ с добавками 9,35% NaCl, 6,1% $Cu_2O$, $SnO_2$, $Sb_2O_3$.

Стекла синтезировались в количестве 200 г в кварцевом тигле с применением кварцевой мешалки при температуре $t$ =1350°C в течение 4 ч, отжиг проводился при $t$ =400°C в муфельной печи N7/H (Nabertherm). Синтезированные стекла имели голубоватую окраску, что связано с присутствием в них ионов двухвалентной меди. Толщина образцов была равна 4 мм. Температура стеклования КАБ стекол, измеренная с помощью дифференциального термического анализатора STA 6000 (Perkin Elmer), составила 390°C. Для формирования нанокристаллов галогенидов меди проводилась термообработка стекол в муфельной печи при $t$ =400°C и $t$ =420°C в течение 10 ч.

Рентгенофазовый анализ (рентгеновский дифрактометр Rigaku) показал наличие в стеклах кристаллических наночастиц CuBr и CuCl. Для стекол с CuBr определен размер наночастиц – 10 нм для случая термообработки при $t$ =420°C и 5 нм при $t$ =400°C, что согласуется с [3, 5]. Согласно [6], в таких стеклах может также присутствовать кристаллическая фаза $K_2CuBr_3$. Образование нанокристаллов CuCl и CuBr в синтезированных стеклах подтверждается присутствием соответствующих экситонных полос поглощения на спектрах оптической плотности (рис. 1, а), измеренных на спектрофотометре Lambda 900 Perkin Elmer. Увеличение температуры термообработки приводит к длинноволновому сдвигу экситонных полос поглощения, что указывает на наличие квантово-размерных эффектов и на зависимость размера нанокристаллов от температуры. «Медленный» фотохромный эффект в синтезированных стеклах отсутствовал даже после длительного облучения ультрафиолетовым излучением.

Фотохромный эффект в стеклах ФХС-7 определяется тем, что наночастицы CuCl, входящие в состав этих стекол, находятся внутри нанопор стекла в свободном состоянии, и между наночастицей и стеклянной матрицей существует вакуумный зазор. В КАБ стеклах вакуумный зазор между наночастицей галогенида меди и стеклянной матрицей отсутствует. По этой причине фотохимическая реакция диссоциации CuCl на атом меди и газообразный хлор оказывается невозможной.

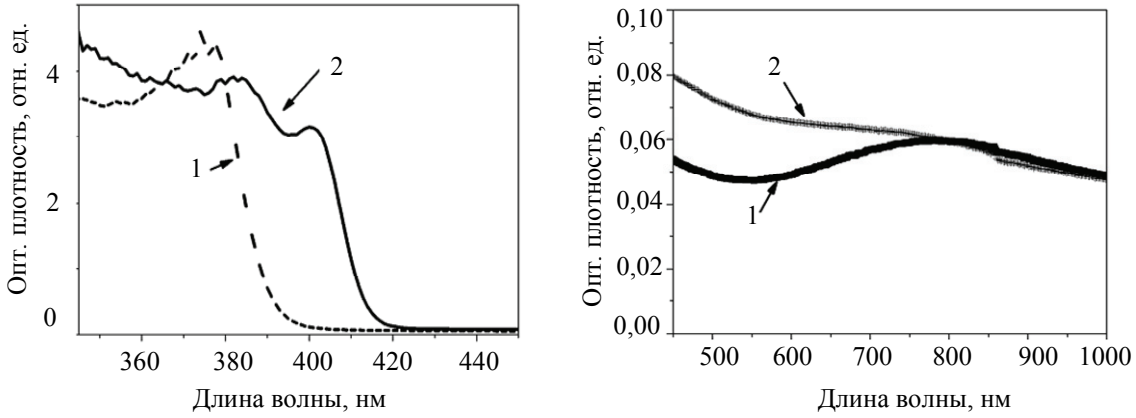



Рис. 1. Спектральная зависимость оптической плотности КАБ стекол с нанокристаллами для разных спектральных диапазонов (а, б): CuCl (1) и CuBr (2)

Исследование нелинейно-оптических свойств проводилось с помощью YAG:Nd лазера SOLAR 512 ($\lambda$=530 нм, $\tau$=7 нс) в многомодовом режиме с энергией излучения в импульсе 68 мДж. Образец помещался в фокальную плоскость телескопа, образованного двумя положительными линзами с фокусным расстоянием 27 мм. Энергия излучения, падающего на образец, варьировалась калиброванными ослабителями. Регистрация излучения, прошедшего через образец, производилась с помощью фотоприемника Coherent J3S-10 и J3-05. Перед фотоприемником размещалась диафрагма диаметром 6 мм.

### Экспериментальные результаты

На рис. 2 показаны экспериментальные зависимости коэффициента пропускания КАБ стекол от энергии падающего излучения в интервале $5\cdot10^{-10}$–$1{,}5\cdot10^{-2}$ Дж. Из рисунка видно, что КАБ стекла с нанокристаллами CuCl имеют выраженную низкопороговую нелинейность в виде ограничения излучения в интервале энергий $5\cdot10^{-10}$–$10^{-8}$ Дж и нелинейность при относительно высоких энергиях излучения в интервале $10^{-4}$–$5\cdot10^{-3}$ Дж (кривая 1). В образце КАБ стекла с нанокристаллами CuBr низкопороговый нели-

нейно-оптический эффект отсутствует, а эффект ограничения излучения в интервале энергии $10^{-4}$–$1{,}5\cdot10^{-2}$ Дж (кривая 1) выражен более явно, чем в стекле первого типа.

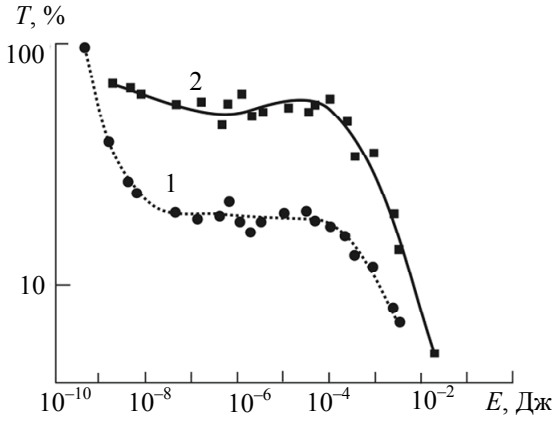



Рис. 2. Нелинейно-оптический отклик λ=530 нм, *t*=7 нс КАБ стекол с нанокристаллами: 1 – CuCl; 2 – CuBr

Из экспериментальных результатов следует, что нелинейно-оптический отклик стекол с нанокристаллами галогенидов меди состоит из двух характерных областей – назкопороговой и высокопороговой. Эти области разделены интервалом энергий, в котором нелинейность выражена слабо. В дальнейшем определим низкопороговую область нелинейности как область I, интервал со слабо выраженной нелинейностью – как область II, высокопороговую область нелинейности – как область III. Рассмотрим процессы, которые могут приводить к формированию отклика в I области нелинейности. Так как плотности энергии в данном диапазоне чрезвычайно малы, то отклик может формироваться только за счет однофотонных процессов поглощения. Тепловыми эффектами в данном диапазоне энергий также можно пренебречь. Ширина запрещенной зоны CuCl равна 3,5 эВ, а CuBr – 2,9 эВ. В случае наночастиц ширина запрещенной зоны может быть больше этой величины благодаря квантово-размерным эффектам. Длине волны 532 нм соответствует фотон с энергией 2,3 эВ. Очевидно, что фотоны с такой энергией не могут приводить к процессам однофотонного межзонного поглощения в нанокристаллах CuHal. В то же время нанокристаллы содержат примеси и дефекты, которые создают глубокие примесные уровни в запрещенной зоне CuHal. Такие примесные уровни являются ловушками для свободных носителей заряда (электронов) [8]. Если энергетический зазор между примесным уровнем и дном зоны проводимости не превышает энергию фотона, то может происходить процесс однофотонного примесного поглощения с генерацией свободного электрона. Увеличение концентрации свободных электронов приводит к изменению (уменьшению) показателя преломления нанокристаллов и, следовательно, к уменьшению эффективного показателя преломления композитной среды в области лазерного пучка. В этом случае в области пучка формируется отрицательная динамическая линза, приводящая к самодефокусировке излучения и, в результате, к ограничению излучения.

Прекращение сильно выраженного нелинейного отклика в области I может быть связано с насыщением примесного поглощения. В то же время в области нелинейности II наблюдается слабо выраженный эффект ограничения. Он может быть связан с каскадными переходами – процессом с участием двух фотонов, сопровождающимся переходом электрона из валентной зоны через примесь в зону проводимости. Вероятность таких процессов невелика, поэтому эффект ограничения слабо выражен.

Наконец, в области нелинейности III снова наблюдается ярко выраженный эффект ограничения. Так как в данном диапазоне плотностей энергии интенсивность излучения в фокусе высока, то могут происходить процессы двухфотонного поглощения, тепловые процессы и фотогенерация нестабильных центров окраски в нанокристаллах CuHal.

Двухфотонное поглощение само по себе сопровождается ограничением излучения. Межзонная фотогенерация электронов, сопровождающая двухфотонное поглощение, приводит к образованию отрицательной динамической линзы и к самодефокусировке излучения. Тепловые процессы вызывают изменение показателя преломления среды в области пучка в результате термоооптического эффекта и возникновения локальных механических напряжений. Данные эффекты могут приводить как к самодефокусировке, так и к самофокусировке излучения. В ряде полупроводников вклад в нелинейное изменение показателя преломления может вносить фоторефрактивный эффект, связанный с возникновением локального электрического поля при диффузии неравновесных носителей заряда. Однако процессы, связанные с диффузией носителей заряда, являются медленными и не могут влиять на нелинейно-оптический отклик в наносекундном диапазоне.

Из рис. 2 видно, что в КАБ стеклах с нанокристаллами CuBr низкопороговый эффект ограничения выражен достаточно слабо по сравнению с КАБ стеклами с нанокристаллами CuCl. В то же время рис. 1, б, показывает, что поглощение стекол первого типа на длине волны лазерного излучения 532,1 нм выше, чем поглощение стекол второго типа. Подробный анализ причин такого различия и выяснение механиз-

мов, приводящих к уменьшению низкопорогового ограничения в стеклах с нанокристаллами CuBr, будет проведен на дальнейших этапах исследования.

### Заключение

Проведенные экспериментальные исследования нелинейно-оптических свойств нанокомпозитов с нанокристаллами галогенидов меди показали, что низкопороговая часть нелинейно-оптического отклика связана с самодефокусировкой излучения при фотогенерации электронов с глубоких примесных уровней. Оптический отклик при $E_{вх} > 2 \cdot 10^{-4}$ Дж связан с фотогенерацией нестабильных центров окраски в нанокристаллах CuHal. Дополнительными эффектами, дающими вклад в нелинейно-оптический отклик при высокой интенсивности излучения, являются двухфотонное поглощение и светоиндуцированная тепловая линза в фокусе лазерного пучка. Экспериментально показано различие между нелинейно-оптическим откликом стекол двух типов. Экспериментальные результаты позволяют сделать вывод, что для создания низкопороговых нелинейно-оптических устройств выгодно использовать КАБ стекла с нанокристаллами CuCl, имеющие порог возникновения отклика на уровне $10^{-10}$ Дж.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (контракт П412 12.05.2010, Минобрнауки РФ).

### Литература

1. Nonlinear absorption and refraction in CuCl at 532 nm / A.A. Said, T. Xia, D.J. E.W. Hagan and Van Stryland // J. Opt. Soc. Am. B. – 1997. – V. 14. – № 4.
2. Низкопороговый нелинейно-оптический отклик фотохромных стекол с нанокристаллами хлорида меди / Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, В.А. Цехомский // Оптический журнал. – 2008. – Т. 75. – № 12. – С. 61–65.
3. Dotsenko A.V., Glebov L.B., Tsekhomsky V.A. Physics and Chemistry of Photochromic Glasses // CRC Press LLC. – 1998. – 190 c.
4. Нелинейно-оптические эффекты в стеклах с нанокристаллами хлорида меди / А.А. Ким, Н.В. Никоноров, А.И. Сидоров, В.А. Цехомский, П.С. Ширшнев // Письма в ЖТФ. – 2011. – Т. 37. – № 9. – С. 22–28.
5. Распределение по размерам наночастиц CuCl в стекле на различных стадиях нуклеации / П.М. Валов, В.И. Лейман // ФТТ. – 2009. – Т. 51. – Вып. 8. – С. 1607–1612.
6. Phase Equilibria in Copper(I) Bromide-MBr Systems (M = Li, Na, K) / A. Wojakowska, E. Krzyzak, A. Wojakowski, M. Wołcyrz // A Journal of Physical Sciences. – 2007. – V. 62a. – P. 507–512.
7. Multiphoton generation of electron-hole pairs in crystals with deep impurities. Two-photon band–impurity transition probabilities / R.S. Levitski, E.Yu. Perlin and Popov A.A. // Opt. J. – 2010. – Т. 77. – P. 3–9.

***Ким Александр Александрович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, kimalexandr@yandex.ru

***Никоноров Николай Валентинович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, Nikonorov@oi.ifmo.ru

***Сидоров Александр Иванович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, aisidrorov@qip.ru

***Цехомский Виктор Алексеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор химических наук, профессор, tsekoms@mail.ru

**УДК 666.225**

## КИНЕТИКА ХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ ФОТО-ТЕРМО-РЕФРАКТИВНОГО СТЕКЛА И НАНОСТЕКЛОКЕРАМИКИ НА ЕГО ОСНОВЕ

**А.И. Игнатьев, Н.В. Никоноров, М.Г. Сорокина**

Впервые исследованы кинетики травления исходного фото-термо-рефрактивного стекла и наноструктурированной стеклокерамики на его основе в растворах HF при различных концентрациях и температурах. Показано, что скорость травления наностеклокерамики в 10 раз выше, чем скорость травления стекла. Показаны перспективы использования фото-термо-рефрактивного стекла и технологии химического травления для создания элементов фотоники и мехатроники.

**Ключевые слова:** фото-термо-рефрактивное стекло, наностеклокерамика, химическое травление.

### Введение

На сегодняшний день одним из перспективных материалов для создания мини- и микромеханических элементов и устройств является Foturan™, разработанный компанией Schott [1–3]. Это фоточувст-

вительный материал, который представляет собой литиево-силикатную систему, активированную фоточувствительными добавками серебра и церия. Для структурно-фазовых изменений в этом материале используется фото-термо-индуцированная кристаллизация стекла. Другими словами, под действием УФ излучения [1, 2] или излучения видимого диапазона фемтосекундной длительности [4] и последующей термической обработки в матрице стекла вырастает кристаллическая фаза в виде микрокристаллов метасиликата лития. Таким образом, рост кристаллической фазы в этом материале происходит только на участках, подвергшихся облучению. Такая структура обладает важной особенностью – скорость химического травления закристаллизованной области в 10–50 раз выше скорости травления стекла [1, 2, 5]. Впервые этот эффект был исследован Stookey S. (Corning) в 1953 г., где использовано фоточувствительное литиево-силикатное стекло, явившееся прообразом коммерческого материала Foturan. Так, например, рис. 1 иллюстрирует большую разницу в кинетике травления стекла и стеклокерамики в плавиковой кислоте [5]. Таким образом, комбинация фото-термо-индуцированной кристаллизации и технологии химического травления используется для создания рельефных или полых мини- и микроструктур сложной формы, которые принципиально не могут быть созданы при помощи традиционных методов механической обработки. Так, например, сегодня Foturan используется для создания микротурбин, микрореакторов, микромембран, датчиков широкой номенклатуры (давления, температуры, химических и биологических веществ и т.д.), 3D-структур и структур типа «lab-on-a chip», микротопливных ячеек типа μ-SOFC, микро-электромеханических устройств типа MEMS и MOEMS и т.д. [1–4, 6].

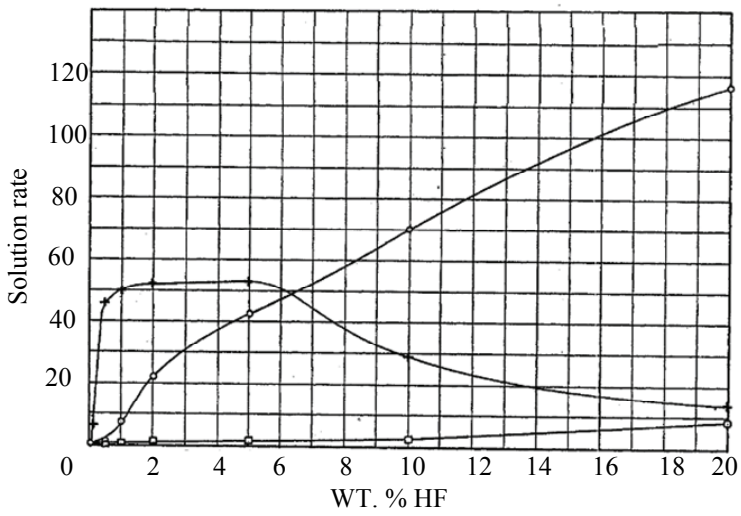



Рис. 1. Зависимость скорости травления от концентрации HF и отношение скоростей травления стекла и наностеклокерамики [5]

Одним из перспективных оптических материалов для создания элементов и устройств фотоники является фото-термо-рефрактивное (ФТР) стекло. ФТР стекла – это новый класс фоточувствительных материалов, предложенный для записи объемных фазовых голограмм в ГОИ им. С.И. Вавилова в 1989 г. [7–11]. ФТР стекла созданы на базе фоточувствительных стекол, которые были разработаны Stookey S. (Corning) в 1977 г. и имели название «полихромные стекла» [12–14]. В отличие от Foturan, ФТР стекло – это фоточувствительный материал на основе натриево-силикатной системы, активированной добавками серебра и церия. В результате фото-термо-индуцированной кристаллизации в облученной области ФТР стекла вырастает наноразмерная кристаллическая фаза в виде нанокристаллов NaF. Различие в показателях преломления стекла и закристаллизованной области ($\Delta n \sim 10^{-3}$) позволяет использовать ФТР стекла для записи высокоэффективных объемных фазовых голограмм [15]. Сегодня существует повышенный интерес к ФТР стеклам, поскольку объемные брэгговские решетки, записанные на их основе, обладают уникальными характеристиками: высокая угловая и спектральная селективность, высокая дифракционная эффективность, высокая механическая, термическая, химическая и оптическая прочность. На основе этих стекол создаются сверхузкополосные фильтры, WDM устройства, комбайнеры мощных световых пучков, чипированные решетки для компрессии световых импульсов, фильтры, повышающие спектральную яркость лазерных диодов, и т.д. [16]. ФТР стекло может быть также активировано ионами редких земель [17, 18]. Таким образом, оно может быть использовано как лазерная среда, а в сочетании с возможностью записи в нем брэгговских решеток появляется возможность создания лазеров с распределенной обратной связью. Важной особенностью ФТР стекла также является возможность создания в нем планарных волноводных структур методом ионного обмена или методом эффузии [19, 20]. Поскольку

структура ФТР стекла близка к структуре Foturan (главное отличие состоит только в составе кристаллической фазы и ее объемной доли), возникают следующие вопросы: можно ли применять к ФТР стеклу технологии химического травления, будут ли отличаться скорости травления кристаллической фазы и стеклообразной, насколько они будут отличаться? Ответы на эти вопросы позволят найти перспективы использования ФТР стекла не только для задач оптики и фотоники, но и для задач микромеханики (по аналогии с Foturan). Следует специально отметить, что, несмотря на большой потенциал и перспективность ФТР стекла, работ по его химическому травлению авторами не обнаружено. По этой причине целью настоящей работы было исследование возможности химического травления ФТР стекла и сравнение скоростей травления стекла и стеклокерамики на его основе.

### Образцы и методика эксперимента

Для проведения эксперимента использовалось ФТР стекло системы $Na_2O$-ZnO-$Al_2O_3$-$SiO_2$-NaF-KBr с добавками $CeO_2$, $Sb_2O_3$, $SnO_2$, $Ag_2O$. Отполированные образцы стекла имели одинаковую геометрическую форму размером 4×8×5 мм. Образцы стекол облучались УФ лампой (в области 310 нм) одинаковой дозой. Термообработка проходила при температуре $T$=500–505°C в течение 10 ч. В результате облучения и последующей термической обработки в облученной области вырастала наноразмерная кристаллическая фаза NaF.

Травление образцов проводилось в растворах плавиковой кислоты с концентрациями 0,5$N$, 1,5$N$, 3$N$, 6$N$ при постоянной температуре и постоянстве гидродинамических условий. Кинетика травления исследовалась для температуры $T$=36°C. Температура травильного раствора поддерживалась при помощи подогрева на магнитной мешалке с регулятором скорости вращения магнитной мешалки и температуры, значение которой контролировалось ртутным термометром. Магнитная мешалка в защитной оболочке помещалась в раствор и находилась в нем в течение всего эксперимента, что позволяло держать заданную температуру и постоянство гидродинамических условий.

Толщина образцов измерялась до и после химического травления с помощью микрометра и часового индикатора с погрешностью 1 мкм.

В ходе работы были определены зависимости толщины стравленного слоя стекла и стеклокерамик в растворах плавиковой кислоты с различными концентрациями.

### Экспериментальные результаты

В работе была исследована зависимость толщины стравленного слоя для стекла и стеклокерамики от времени травления. В качестве примера на рис. 2 приведены экспериментальные зависимости при концентрации 3$N$.

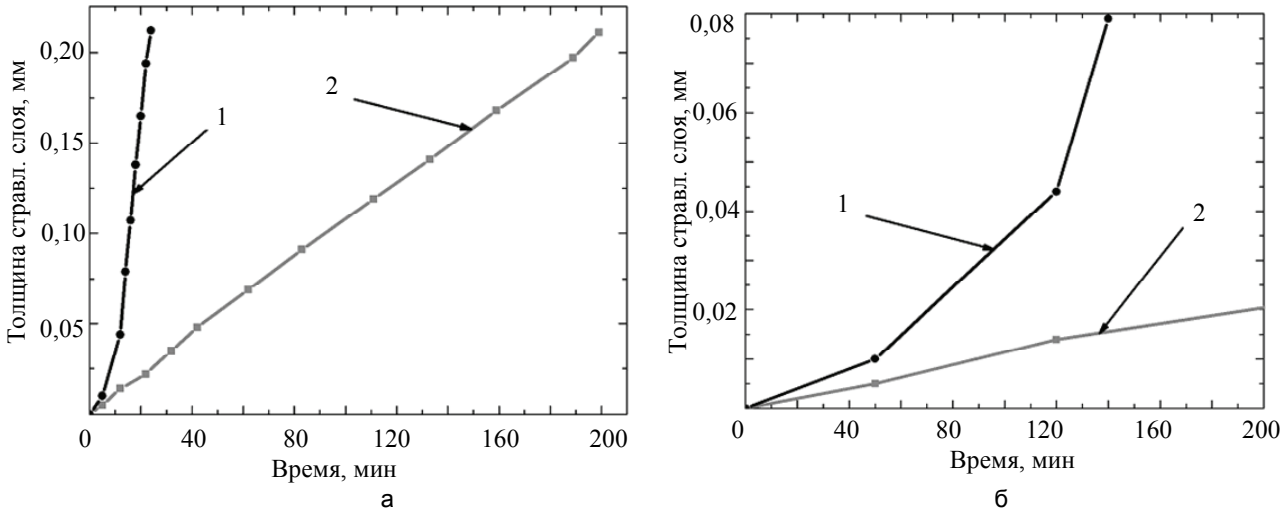



Рис. 2. Зависимость толщины стравленного слоя от времени травления (а). Концентрация 3$N$, температура 36°C. Начальный участок травления показан в увеличенном масштабе (б); 1 – наностеклокерамика; 2 – стекло

Из рис. 2 видно, что скорость травления стеклокерамики значительно превышает скорость травления стекла. Аналогичные результаты наблюдаются и при травлении образцов в растворах кислот остальных концентраций.

На рис. 3 представлены зависимости скоростей травления образцов от концентрации плавиковой кислоты. При этом ход полученных зависимостей близок к результатам Stookey S. [5] при работе с литиево-силикатными стеклами.

На рис. 4 показан образец ФТР стекла, наполовину облученный УФ излучением. После термообработки и химического травления на границе облученной и необлученной областей видна ступенька, которая наглядно иллюстрирует различие в скоростях травления стеклокерамики (левая часть образца) и стекла (правая часть образца)

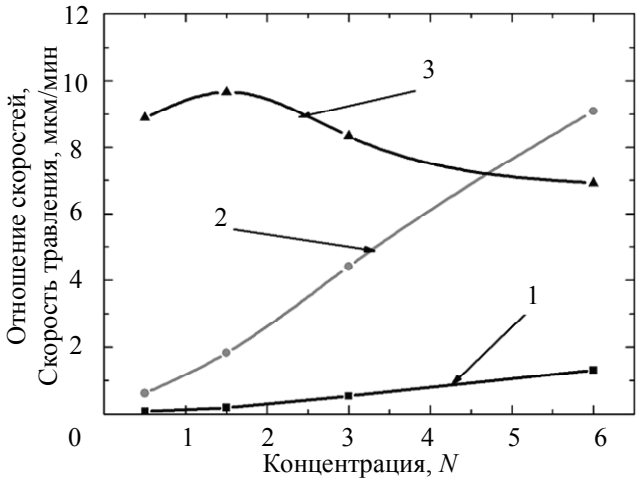



Рис. 3. Зависимость скорости травления от концентрации HF и отношение скоростей травления стекла и наностеклокерамики при температуре 36°С; 1 – скорость травления стекла; 2– скорость травления наностеклокерамики; 3 – отношение скоростей травления наностеклокерамики и стекла

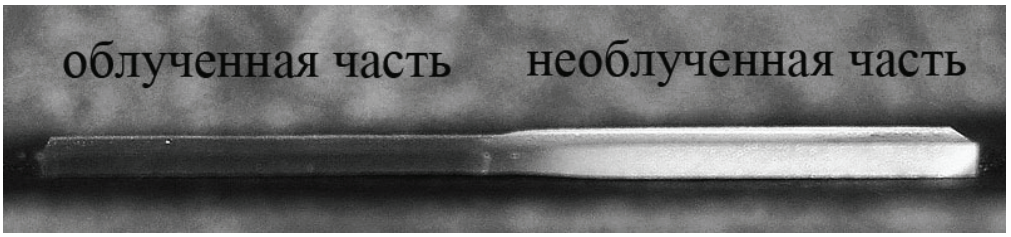



Рис. 4. Фотография торца образца ФТР стекла. Исходная толщина образца $h$=1мм. Левая часть образца облучена УФ излучением, правая часть образца не облучена. Температура термообработки $T$=500°С, время термообработки $t$ =10 ч. После травления получена ступенька: толщина правой части образца $h$=0,85 мм и толщина левой части образца $h$=0,59 мм

Резкое отличие в скоростях травления стекла и стеклокерамики может быть связано с несколькими причинами. Известно, что кристаллы NaF хорошо растворяются как в воде, так и в HF [21]. В случае стеклокерамики дело связано с кристаллической фазой NaF в матрице стекла. Исходя из этого, области стекла, имеющие повышенную концентрацию кристаллической фазы NaF, будут вытравливаться гораздо быстрее, чем стекло.

Для доказательства актуальности этого механизма было синтезировано ФТР стекло без фторидов и проведено сравнение его с исходным ФТР стеклом, содержащим фториды. Результаты травления показали, что стекло без фторидов травится медленнее, чем фторидсодержащее стекло (рис. 5).

Одновременно с первым механизмом не исключен второй механизм, а именно – влияние размерного эффекта на скорость травления. Размер нанокристаллов NaF в стеклокерамике составляет 10–30 нм. В этом случае поверхность кристаллов NaF может играть существенную роль по сравнению с их объемом. При малых размерах нанокристаллов может образовываться энергоизбыточная структура, которая может приводить к образованию дефектного поверхностного слоя. В результате образования таких дефектов скорость травления может возрасти. Однако этот механизм требует дальнейших исследований.

Следует также обратить внимание на начальный участок травления, показанный в увеличенном масштабе на рис. 2, б. Он свидетельствует об индукционном периоде травления для стеклокерамики. В то же время у стекла такой индукционный период отсутствует. Так, на глубине до 5 мкм от поверхности скорости травления стеклокерамики и стекла практически совпадают. Далее, с увеличением глубины стравленного слоя, наблюдается существенное увеличение скорости травления стеклокерамики по сравнению со стеклом. Этот эффект может быть объяснен следующим образом. В работах [19–20] показано, что при термообработке ФТР стекла в поверхностном слое увеличивается показатель преломления, и такой слой обладает волноводными свойствами. Объясняется этот эффект улетом (эффузией) фторидов с поверхностных слоев в результате термической обработки. В данном случае, наличие индукционного периода на начальной стадии травления стеклокерамики также может объясняться эффузией фторидов. Иначе говоря, на начальной стадии травится поверхностный «эффузионный» слой, который обеднен

фторидами, и, соответственно, кристаллическая фаза NaF на поверхности стеклокерамики практически отсутствует. В этом случае скорость травления поверхностного слоя замедлена. При увеличении глубины травления, когда «эффузионный» слой практически удален, скорость травления керамики резко возрастает, поскольку плавиковая кислота контактирует уже с кристаллической фазой.

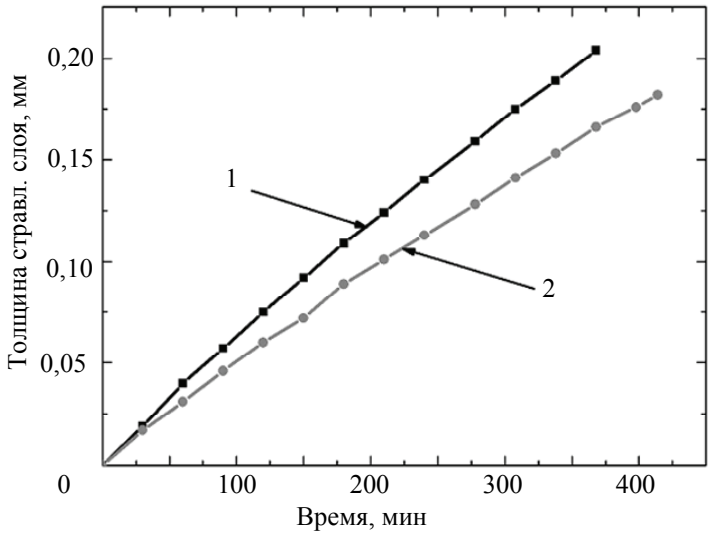



Рис. 5. Зависимость толщины стравленного слоя от времени травления, концентрация 3*N*; 1 – МХС4; 2 – безфторидное стекло

**Заключение**

В работе впервые обнаружено различие в скоростях травления стеклообразной и кристаллической фазы ФТР стекла. Скорость травления закристаллизованной области в 10 раз выше, чем у исходного стекла. Предложен механизм, объясняющий отличие в скоростях травления ФТР стекла и стеклокерамики на его основе. Полученные данные показывают, что на основе ФТР стекла при комбинированном использовании фото-термо-индуцированной кристаллизации и химического травления возможно создание принципиально новых элементов и устройств фотоники и мехатроники.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 г.г. (контракт П412 12.05.2010, Минобрнауки РФ).

**Литература**

1. Dietrich T.R., Ehrfeld W., Lacher M., Kramer M., Speit B. Fabrication technologies for Microsystems utilizing photoetchable glass // Microelectronic Engineering. – 1996. – V. 30. – № 1–4. – P. 497–504.
2. Livingston F.E., Helvajian H. Variable UV laser exposure processing of photosensitive glass-ceramics: maskless micro- to meso-scale structure fabrication // Applied Physics A: Materials Science & Processing. – 2005. – V. 81. – № 8. – P. 1569–1581.
3. Dietrich T.R., Freitag A., Scholz R. Production and characteristics of microreactors made from glass // Chem. Eng. Technol. – 2005. – V. 28. – № 4. – P. 1–7.
4. Cheng Y., Sugioka K., Masuda M., Toyoda K., Kawachi M., Shihoyama K., Midorikawa K. 3D microstructuring inside Foturan glass by femtosecond laser // RIKEN Review. – 2003. – № 50. – P. 101–106.
5. Stookey S.D. Chemical Machining of Photosensitive Glass // Industrial and engineering chemistry. – 1953. – 45(1). – P. 115–118.
6. Tölke R., Hütter A.B., Rupp J.L.M., Gauckler L.J. Foturan® Glass Ceramic – a Substrate for Power Delivering Free-standing μ-SOFC Membranes // ECS Trans. – 2009. – № 25. – P. 983.
7. Глебов Л.Б., Никоноров Н.В., Панышева Е.Н., Туниманова И.В., Саввин В.В., Цехомский В.А. Фототермо-рефрактивное стекло // Труды VII Всес. конф. по радиационной физике и химии неорганических материалов. Ч. 2. – Рига: Изд-во ИФ АН Латв. ССР, 1998. – 527 с.
8. Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Туниманова И.В., Савин В.В. Мультихромные стекла – новая среда для оптической записи информации // Труды Всес. конф. «Оптическое изображение и регистрирующие среды». – Л: Изд. ГОИ, 1990. – С. 48.
9. Глебов Л.Б., Никоноров Н.В., Панышева Е.Н., Г.Т. Петровский, Саввин В.В., Туниманова И.В. Мультихромные стекла – новые материалы для записи объемных фазовых голограмм // ДАН СССР. – 1990. – Т. 314. – № 4. – С. 849–853.

10. Кучинский С.А., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Савин В.В., Туниманова И.В. Свойства объемных фазовых голограмм на мультихромных стеклах // Опт. и спектр. – 1992. – Т. 70. – № 6. – С.1269–1300.
11. Глебов Л.Б., Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Петровский Г.Т., Савин В.В., Туниманова И.В., Цехомский В.А. Новые возможности фоточувствительных стекол для записи объемных фазовых голограмм // Опт. и спектр. – 1992. – Т. 73. – № 2. – С. 404–412.
12. Pierson J.E. and S.D. Stookey. Photosensitive Colored Glasses. – US Patent 4017318, 1977.
13. Pierson J.E. and S.D. Stookey. Method for Making Photosensitive Colored Glasses, US Patent 4057408, 1977.
14. Stookey S.D., Beal G.H. and J.E. Pierson. Full-Color Photosensitive Glass // J. Appl. Phys. – 1978. – V. 49. – № 10. – P. 5114–5123.
15. Efimov O.M., Glebov L.B., Glebova L.N., Richardson K.C. and V.I. Smirnov. High Efficiency Bragg Gratings in Photo-Thermo-Refractive Glas // Appl. Opt. – 1999. – V. 38. – № 2. – P. 619–627.
16. Efimov O.M., Glebov L.B., Glebova L.N., Smirnov V.I. Process for production of high efficiency volume diffractive elements in photo-thermo-refractive glass. – US Patent 6586141B1, 2003.
17. Nikonorov N., Aseev V., Ignatiev A., Zlatov A. New polyfunctional photo-thermo-refractive glasses for photonics applications // Technical Digest of 7th International Conference on Optics-photonics Design & Fabrication, ODF'10. – Yokogama: Japan, 19–21 April 2010. – P. 209–210.
18. Nikonorov N.V., Tsekhomsky V.A., Ignatiev A.I., Aseev V.A. Ytterbium-erbium doped photothermorefractive glass // Proceedings of 15 th International Conference on luminescence and Optical Spectroscopy of Condensed Matter. – Lyon: France, Universite de Lyon, 2008. – P. 503.
19. Никоноров Н.В., Панышева Е.И., Туниманова И.В., Харченко М.В. Особенности окрашивания мультихромных стекол под действием лазерного излучения // Физика и химия стекла. – 1993. – Т. 19. – № 3. – С. 442–448.
20. Киселев С.С., Никоноров Н.В. Создание градиентных волноводов на фото-термо-рефрактивном стекле и измерение их профиля показателя преломления // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2008. – № 52. – С. 50–55.
21. Лидин Р.А., Молочко В.А., Андреева Л.Л. Химические свойства неорганических веществ: Учебник. – М.: Химия, 2000. – 3-е изд. – 480 с.

***Игнатьев Александр Иванович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, нач. лаборатории, ignatiev@oi.ifmo.ru

***Никоноров Николай Валентинович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой, Nikonorov@oi.ifmo.ru

***Сорокина Марина Геннадьевна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, ovenka100@mail.ru

**УДК 004.932.2**

# ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗБИЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ В ФОРМЕ КВАДРОДЕРЕВА ПО КРИТЕРИЮ МИНИМАЛЬНОЙ ДЛИНЫ ОПИСАНИЯ ВО ФРАКТАЛЬНОМ СЖАТИИ

**В.В. Окунев, А.С. Потапов**

Проведено исследование эффективности разбиения изображения в форме квадродерева применительно к фрактальным методам компрессии. На основе принципа минимальной длины описания введен информационный критерий разделения рангового блока на подблоки. Показано, что модифицированный метод разбиения по квадродереву позволяет достигать одновременного увеличения степени компрессии и качества восстановленного изображения по сравнению с традиционными методами, основанными на критерии порогового значения среднеквадратичного отклонения блоков.

**Ключевые слова**: фрактальное сжатие, компрессия изображений, минимальная длина описания, квадродерево, оптимизация.

## Введение

В настоящее время благодаря значительному распространению электронно-вычислительной техники хранение и обработка данных различного типа осуществляется преимущественно в цифровом виде. Все бóльшую значимость приобретают мультимедийные типы данных – видеофайлы, аудиозаписи, цифровые изображения. В связи с этим одной из актуальных проблем современных информационных технологий представляется разработка эффективных методов компрессии (сжатия) мультимедийных данных, а в особенности – графической информации. Актуальность подчеркивается тем, что технологии обработки, хранения, передачи и защиты информации входят в Перечень критических технологий Российской Федерации.

К мультимедийной информации чаще всего применяется сжатие с потерями. Справедливость такого применения обусловлена тем фактом, что для мультимедийных объектов, как правило, можно отказаться от хранения каких-либо их особенностей (например, мелких деталей на изображении, не воспри-

нимаемых человеческим ухом звуковых частот в аудиозаписи) в пользу увеличения степени компрессии. В действительности существуют распространенные алгоритмы компрессии без потерь и для мультимедийных объектов, такие как FLAC для звуковых файлов или PNG для цифровых изображений. Однако такие форматы проектировались как универсальные для своего типа данных и, как следствие, оказались неспособными учитывать особенности конкретного сжимаемого файла, что в результате привело к существенному проигрышу в степени сжатия по сравнению с аналогичными алгоритмами компрессии с потерями.

Для цифровых изображений как класса мультимедийных данных в настоящее время единственным действительно широко используемым форматом сжатия с потерями является JPEG, получивший широкое применение благодаря распространению цифровых фотоаппаратов, сканеров и других устройств захвата изображений. С учетом количества представленных в формате JPEG изображений очевидны весьма значительные потери, связанные с хранением, передачей и обработкой, возможно, неоптимально (по качеству и степени компрессии) сжатой информации.

С учетом вышесказанного представляется актуальным исследование методов сжатия, основанных на иных представлениях изображений (по сравнению с наиболее распространенными пространственно-спектральными), к которым относятся фрактальные представления, опирающиеся на общее свойство самоподобия изображений. Однако существующие методы фрактального сжатия изображений требуют существенного развития, чтобы их можно было рассматривать в качестве реальной альтернативы JPEG для многих классов изображений, используемых как в научно-технической сфере, так и в повседневной жизни. В частности, остается открытым вопрос о выборе разбиения изображения на ранговые блоки, которое бы обеспечивало максимальное качество восстановленного изображения. В настоящей работе рассмотрена задача оптимизации такого выбора для фрактальных методов компрессии.

Необходимо отметить, что для сохранения практической приемлемости метода фрактального сжатия число сравниваемых разбиений должно расти медленнее, чем линейная функция от размера изображения. Одной из распространенных реализаций такой идеи является разбиение в форме квадродерева [1, 2]. Основная идея такого разбиения – это разделение рангового блока на равные подблоки и повторный поиск оптимальных доменов в случае, если найденное сходство не удовлетворяет какому-либо критерию. Как правило, в качестве такого критерия используется пороговое значение среднеквадратичного отклонения (СКО) рангового блока от оптимального домена. Такой подход нельзя признать универсальным, так как, во-первых, не существует однозначного алгоритма определения данного порогового значения, а во-вторых, учитывается только качество восстановленного изображения, что может привести к ухудшению результирующей степени компрессии. В работе предложен новый критерий разделения на подблоки, лишенный вышеописанных недостатков. Данный критерий базируется на требованиях принципа минимальной длины описания (МДО).

### Принцип минимальной длины описания

Основная идея принципа МДО является воплощением широко известного философского правила бритвы Оккама, которое гласит: «То, что можно объяснить посредством меньшего, не следует выражать посредством большего», или «Без необходимости не следует утверждать многое».

Сформулируем принцип МДО следующим образом: «Среди множества моделей следует выбрать ту, которая позволяет минимизировать сумму: 1) длины описания модели (в битах); 2) длины данных, описанных посредством этой модели (в битах)» [3]. Такую формулировку можно считать обобщением нескольких концепций, предложенных разными исследователями в области машинного обучения [4]. Эти концепции отличаются в деталях, однако все они связываются авторами с теоретико-информационной формализацией правила бритвы Оккама.

Приведем некоторые пояснения, которые позволят отождествить понятия, использующиеся в формулировке принципа МДО и в теории фрактального сжатия, или – обобщая – в теории сжатия изображений с потерями. Под *моделью* будем понимать некоторую информационную структуру, которая представляет собой закодированное (сжатое) изображение, полученное в результате работы той или иной разновидности алгоритма компрессии, который в данном случае будет являться представлением изображений. Модель в компактной форме отражает закономерности в исходных данных и позволяет их восстановить с большой точностью. В качестве *длины описания модели* будем рассматривать объем $L_{img}$ сжатого изображения в битах. *Длину данных, описанных посредством модели*, обозначим через $L_{loss}$. При построении полного описания изображения эту часть данных также необходимо учитывать для получения корректной оценки критерия МДО. В случае сжатия с потерями данный компонент длины описания – это «объем потерь», т.е. количество информации, содержащееся в отклонении восстановленного после сжатия изображения от исходного изображения. Таким образом, принцип МДО обобщает один из стандартных критериев оценивания качества восстановленного изображения и в то же время позволяет построить интегральный критерий эффективности сжатия:

$$L = L_{loss} + L_{img}.$$

Полученный критерий может применяться при оценке качества компрессии изображений с потерями [5]. Для расчета суммарной длины описания сжатого изображения необходимо оценить каждый из компонентов данного критерия.

Для оценки $L_{img}$ рассмотрим, какую информацию необходимо сохранить в сжатом файле, чтобы иметь возможность осуществить восстановление изображения. Если рассматривается один из $N_R$ вариантов разбиения изображения на ранговые блоки, то в среднем будет необходимо $\log_2 N_R$ бит для указания, какое именно разбиение было выбрано. Предположим, что для каждого такого разбиения детерминированным образом устанавливается множество доменных блоков, т.е. отдельно описывать множество доменов не требуется. Далее необходимо указать, какому доменному блоку соответствует каждый ранговый блок. Если число доменных блоков для выбранного варианта разбиения равно $n_d$, то для кодирования номера доменного блока потребуется $\log_2 n_d$ бит. Также необходимо закодировать коэффициенты преобразования. Пусть число коэффициентов преобразования равно $n_p$, а на каждый из них нужно выделить в среднем $B_{n_p}$ бит. Таким образом, размер сжатого изображения можно оценить как

$$L_{img} = \log_2 N_R + n_r(\log_2 n_d + n_p B_{n_p}). \quad (1)$$

Оценка $L_{loss}$ может быть произведена следующим образом. Представим разность исходного и восстановленного изображений тоже как изображение, которое может быть каким-либо образом закодировано. Для выполнения простейшей оценки будем полагать, что отклонения в каждом пикселе являются независимыми отсчетами некоторой случайной величины. Если считать, что это предположение нарушается, то в указанной разности должны сохраняться какие-либо регулярные компоненты, которые следовало бы вынести в модель изображения.

Пусть $f(x,y)$ – оригинальное изображение, а $\hat{f}(x,y)$ – восстановленное, тогда для простейшей оценки количества информационных потерь в результате сжатия можно использовать энтропию разностей:

$$L_{loss} = S \cdot H[\hat{f}(x,y) - f(x,y)], \quad (2)$$

где $S$ – площадь изображения; $H(x) = -\sum_{i=0}^{n-1} p_i \log_2 p_i$, $p_i = \frac{h_i}{S}$, $h_i$ – количество пикселей яркости *i*, а *n* – количество градаций серого. Таким образом, интегральный критерий эффективности сжатия, построенный на основе принципа МДО, будет иметь следующий вид:

$$L = L_{loss} + L_{img} = S \cdot H[\hat{f}(x,y) - f(x,y)] + \log_2 N_R + n_r(\log_2 n_d + n_p B_{n_p}). \quad (3)$$

Для сравнения качества сжатия изображения при различных параметрах компрессии необходимо для каждого из наборов параметров вычислить длину описания *L* закодированного изображения. Набор параметров, при котором будет достигаться минимальное значение *L*, будет обеспечивать оптимальную (одновременно по степени сжатия и качеству восстановленного изображения) компрессию.

### Квадродерево

Вышеописанная схема может быть применена для оценки длины описания закодированного изображения в процессе построения квадродерева. Рассмотрим случай, когда изображение разбито на ранговые блоки равных размеров и для каждого рангового блока найден оптимальный домен. После этого по каждому ранговому блоку необходимо проверить, может ли привести его разделение на подблоки к уменьшению длины описания. Такая проверка производится с использованием критерия МДО, при этом слагаемое $L_{loss}$ вычисляется через значение СКО. Вычисление $L_{loss}$ напрямую через энтропию невязок блоков не может быть использовано ввиду того, что применительно к блокам изображения подобный способ дает весьма неточные результаты из-за относительно малого количества пикселей, принадлежащих блоку. Осуществлять декомпрессию изображения на каждом шаге разделения блоков нецелесообразно, поэтому, в частности, не представляется возможным напрямую сравнивать значения СКО оригинального изображения от восстановленного; вместо этого используется оценочное значение СКО, которое вычисляется как среднее арифметическое всех значений СКО ранговых блоков от соответствующих доменов.

Уточним компоненты формулы (3) для случая квадродерева. Пусть все ранговые блоки имеют размер $r \times r$ пикселей, а домены – $d \times d$ пикселей, при этом $d = 2r$. Через $r_i$ будем обозначать *i*-й ранговый блок. Оценка $\Delta L_{loss}^{(r_i)}$ разности между СКО, соответствующим *i*-му ранговому блоку, и СКО, соответствующим всему изображению, будет выглядеть так:

$$\Delta L_{loss}^{(r_i)} = 0{,}75 r^2 \left(\log_2 \mathrm{RMSE}(r_i, d_i) - \log_2 \overline{\mathrm{RMSE}}_f\right), \quad (4)$$

где RMSE – среднеквадратичное отклонение (root mean square error), а $\overline{\text{RMSE}}_f$ – оценка СКО восстановленного изображения от оригинального, вычисляемая по следующей формуле:

$$\overline{\text{RMSE}}_f = \frac{1}{n_r}\sum_{j=1}^{n_r}\text{RMSE}(r_j, d_j),$$

где $n_r$ – общее количество ранговых блоков. Коэффициент 0,75 в формуле (4) вводится для обеспечения приближенного равенства оценке (2).

Оценку $L_{img}$ также уточним. Вместо кодирования номера разбиения (из $N_R$ возможных) в случае квадродерева следует хранить для каждого рангового блока информацию о том, разделен ли он на подблоки или нет. Для того чтобы найти величину $\Delta L_{img}^{(r_i)}$, которая показывает изменение длины описания в случае разделения *i*-го рангового блока на подблоки, необходимо сравнить длину описания сжатого файла до и после разделения, считая подблоки самостоятельными блоками. Так как рассматривается всего один способ разбиения на ранговые блоки, то $\log_2 N_R = \log_2 1 = 0$. В силу того, что в сжатом файле добавляется описание четырех подблоков и удаляется описание «родительского» рангового блока, получим $n_r = 4 - 1 = 3$. В соответствии с формулой (1) для $L_{img}$, а также с учетом дополнительного бита для указания факта разделения блока, имеем:

$$\Delta L_{img}^{(r_i)} = 3(\log_2 n_d + n_p B_{n_p} + 1). \qquad (5)$$

Принимая во внимание формулы (4) и (5), получаем следующий итоговый критерий МДО, позволяющий определить для каждого рангового блока рациональность его разбиения на подблоки:

$$\Delta L^{(r_i)} = \Delta L_{loss}^{(r_i)} + \Delta L_{img}^{(r_i)} = 0{,}75r^2\left(\log_2 \text{RMSE}(r_i, d_i) - \log_2 \overline{\text{RMSE}}_f\right) + 3(\log_2 n_d + n_p B_{n_p} + 1).$$

Справедливость $\Delta L^{(r_i)} \le 0$ для рассматриваемого рангового блока означает, что его разделение на подблоки увеличит качество сжатия, а именно, улучшит качество восстановленного изображения, а длина сжатого файла возрастет незначительно. Если же имеет место $\Delta L^{(r_i)} > 0$, то следует разделение текущего рангового блока считать нерациональным и переходить к рассмотрению следующего блока.

Предположим, что после рассмотрения конкретного рангового блока было принято решение о разделении его на подблоки. Тогда за СКО, соответствующее этому ранговому блоку, принимается среднее арифметическое от СКО, соответствующее его подблокам, и после этого пересчитывается значение СКО для всего изображения. Подсчеты для дальнейших рассматриваемых ранговых блоков производятся уже с учетом измененного СКО всего изображения.

Предположим, что все ранговые блоки изображения были рассмотрены, и для некоторых из них было принято решение о разделении на подблоки. После этого те ранговые блоки, которые не подлежат дальнейшему разделению, выводятся из рассмотрения, а подблоки подлежащих разделению блоков рассматриваются как самостоятельные ранговые блоки. Таким образом, процесс рекурсивно повторяется до тех пор, пока не будет достигнуто минимальное допустимое значение размера рангового блока, либо пока любая попытка дополнительного разбиения блока не станет приводить к увеличению длины описания.

Сделаем отдельное замечание по поводу размеров доменных блоков. В предлагаемом алгоритме разбиения размер доменов остается постоянным для любого уровня квадродерева, меняется лишь его масштабирующий коэффициент. В действительности есть возможность для каждого множества ранговых блоков генерировать множество доменов так, чтобы соотношение размеров было постоянным – в общем случае это позволит достигать меньшего значения СКО, соответствующего ранговым блокам, и, как следствие, лучшего качества восстановленного изображения. Однако стоит учитывать, что одновременно с увеличением количества классов рассматриваемых доменов возрастет длина описания сжатого изображения, а также, в связи со значительным увеличением количества самих рассматриваемых доменов, существенно возрастут временны́е затраты на компрессию, что является нежелательным.

### Экспериментальная проверка

Описанная модификация метода выбора разбиения изображения в форме квадродерева на основе принципа МДО при фрактальном сжатии была протестирована на выборке из 40 изображений различных классов. На рисунках приведены примеры разбиения некоторых изображений выборки. На рис. 1 изображения разбиты на ранговые блоки по традиционной схеме квадродерева для различных значений порога на СКО. Видно, что форма разбиения зависит от устанавливаемого порога; при этом невозможно заранее предугадать, какой именно порог обеспечит наилучшее качество сжатия. На рис. 2 приведены примеры разбиения с применением критерия МДО. В силу того, что оценка результирующего качества сжатия производится уже в процессе компрессии, можно утверждать, что полученные разбиения являются оптимальными в смысле минимизации длины описания сжатого изображения. Также отметим, что в отличие от традиционного алгоритма формирования квадродерева, включающего разбиение блоков на

подблоки по критерию порогового значения СКО, построение данных разбиений производилось без ручного задания каких-либо параметров, т.е. полностью автоматически.

В таблице приведено сравнение результатов компрессии изображений для традиционного и оптимизированного метода формирования квадродерева. В таблице указаны значения длин описания, которые характеризуют общее качество компрессии (длину сжатого файла и объем информационных потерь). Были рассмотрены три значения порога на СКО: 5, 10 и 20. Для каждого из этих значений была проведена компрессия и выбран лучший результат (однако для изображения Cloud результат при минимальном пороге оказался слишком плохим – 145208 бит, поэтому расчеты были проведены вплоть до порога на СКО, равного 3).

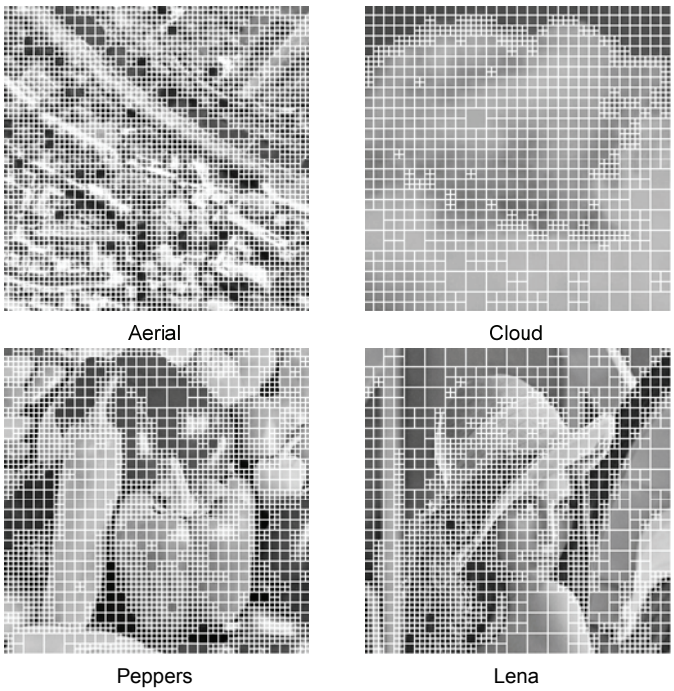



Рис. 1. Примеры разбиения в форме квадродерева с применением критерия порогового значения СКО

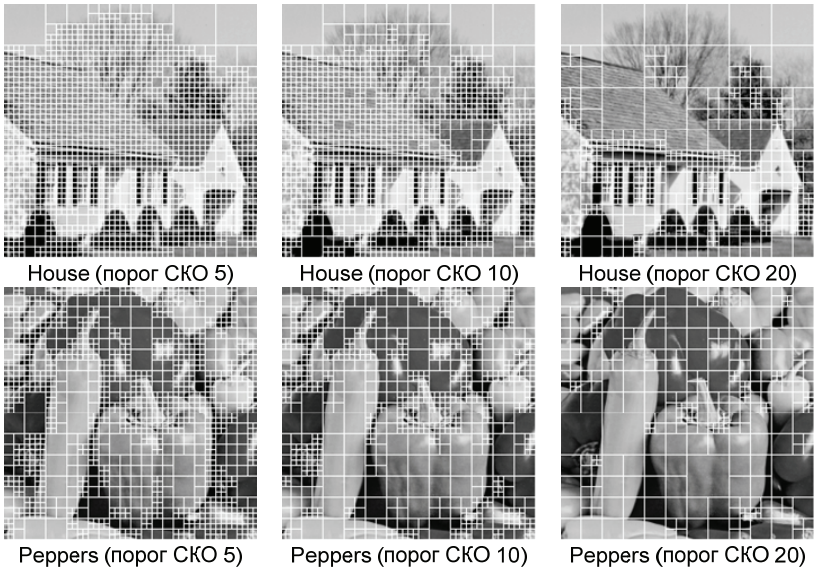



Рис. 2. Примеры разбиения в форме квадродерева с применением критерия МДО

| Изображение | Порог СКО | $L_{СКО}$, бит | $L_{МДО}$, бит |
|---|---|---|---|
| Cloud | 3 | 88530 | 66765 |
| House | 20 | 356298 | 340717 |
| Lena | 10 | 268829 | 248291 |
| Peppers | 10 | 260500 | 234252 |

Таблица. Результаты компрессии

Значения результирующих длин описания при неоптимальных порогах на СКО оказываются хуже приведенных в таблице – например, для изображения House они составляют 366519 бит (для порога 5) и 362298 бит (для порога 10).

Из таблицы видно, что выигрыш в качестве компрессии при использовании разбиения по критерию МДО составляет в среднем почти 15%. Заметим, что полученный выигрыш в длине описания эквивалентен выигрышу в 1,2–1,5 раза по степени сжатия при равном качестве восстановленного изображения или в 1,1–1,3 раза по качеству изображения (измеряемому по показателю PSNR) при равной степени компрессии.

### Заключение

В работе исследован метод оптимизации разбиения в форме квадродерева для фрактального сжатия изображений. В целях оценки влияния параметров разбиения на качество сжатия предложено использовать критерий МДО. Показано, что данный критерий является адаптивным к особенностям изображений, а также учитывает не только качество восстановленного изображения, но и результирующую степень компрессии.

Хотя принцип МДО не принято применять в задачах компрессии, поскольку он сам сводится к использованию степени компрессии как критерия выбора модели, тем не менее, данный принцип оказывается здесь полезным. Это связано с тем, что при компрессии нередко выбор модели оказывается подзадачей, решаемой, однако, независимо на основе неоптимальных эвристических критериев. Успешность применения принципа МДО для улучшения метода фрактального сжатия показывает перспективность его внедрения и в другие методы компрессии, что должно улучшить их адаптивность к содержанию изображений и повысить качество сжатия.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки и Совета по грантам Президента РФ (грант МД-2040.2010.9).

### Литература

1. Ghim Hwee Ong, Chorng Meng Chew, Yi Cao. A simple partitioning approach to fractal image compression // Proc. ACM Symposium on Applied Computing. – 2001. – P. 301–305.
2. Yigang Wang, Yiwen Jin, Qunsheng Peng. Merged quadtree fractal image compression // Optical Engineering. – 1998. – V. 37. – № 8. – P. 2284–2289.
3. Rissanen J. Hypothesis selection and testing by the MDL principle // The Computer Journal. – 1999. – V. 42. – № 4. – P. 260–269.
4. Vitanyi P.M.B., Li M. Minimum description length induction, Bayesianism, and Kolmogorov complexity // IEEE Trans. on Information Theory. – 2000. – V. 46. – № 2. – P. 446–464.
5. Окунев В.В., Потапов А.С. Анализ фрактального представления изображений по критерию репрезентационной минимальной длины описания // Труды научно-исследовательского центра Фотоники и оптоинформатики. Сб. статей / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. – Вып. 2. – С. 315–325.

***Окунев Вадим Вячеславович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, мл. научный сотрудник, vadik-okunev@yandex.ru

***Потапов Алексей Сергеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, pas.aicv@gmail.com

**УДК 004.932.2**

## АНАЛИЗ МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ ДВИЖУЩИХСЯ ОБЪЕКТОВ НА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯХ С ШУМАМИ

**В.А. Козлов, А.С. Потапов**

Рассмотрены наиболее часто используемые методы выделения движущихся объектов применительно к видеопоследовательностям, полученным с бытовых камер в условиях присутствия шумов на изображениях. Выделены основные проблемы обработки таких видеопоследовательностей, описана невозможность применения классических методов и предложены пути улучшения качества выделения движущихся объектов.

**Ключевые слова**: анализ движения, контур, выделение объектов, сегментация.

### Введение

В последнее время при организации видеонаблюдения применяются преимущественно цифровые методы обработки и хранения информации. Цифровые технологии дают ряд преимуществ перед устаревшими методами аналоговой записи на пленку. Например, в среднем качестве средний жесткий диск может хранить объем информации, соответствующий видеозаписи в течение месяца, а также обеспечи-

вается быстрый доступ к любой части записи, что можно сделать из любой точки мира, если записывающий компьютер подключен к сети.

Компьютеры предоставляют широкие возможности по автоматической обработке изображений, которая все еще используются лишь в незначительной степени. Такие простые задачи, как выполнение записи только движений, имеют достаточно универсальные решения. Однако более сложные задачи, особенно из области компьютерного зрения, до сих пор не имеют общих решений, а предлагаемые алгоритмы, как правило, применимы только при соблюдении ряда условий и ограничений. В связи с этим на сегодняшний день данная область исследований представляет большой интерес как в научном, так и в прикладном плане. Одной из важных, но до конца не решенных подзадач является автоматическое выделение движущихся объектов, что является необходимым предварительным шагом при решении таких задач видеонаблюдения, как системы контроля доступа, удаление фона, ориентация роботов в пространстве, системы помощи водителям, распознавание лиц, облегчение восприятия сцены человеческим глазом и многих других.

В работе рассматривается вопрос выделения движущихся объектов на реальных видеопоследовательностях, полученных с бытовых видеокамер. Проведен сравнительный анализ существующих решений на базе методов выделения контура и области движущегося объекта, а также авторская модификация этих методов. Проанализировано быстродействие и качество результата в зависимости интенсивности шумов, типа сцены, характеристик захвата и оцифровки видео. Описаны трудности, возникающие при внедрении этих алгоритмов в реальные системы. Обосновывается несостоятельность существующих методов, предложены пути для улучшения качества результата, чтобы получить универсальный метод предварительной обработки информации в системах видеонаблюдения.

**Подходы к выявлению движущихся объектов**

Существует два основных класса методов выделения движущихся объектов:

1. путем анализа их границ (контуров);
2. путем анализа всей области объекта на кадрах [1–4].

Основной идеей методов первого класса является поиск отличий векторов оптического потока с последующим построением контуров движущихся объектов [1–4]. Методы второго класса, наоборот, основываются на группировании сходных векторов из оптического потока в области, которые подаются на выход алгоритма в качестве движущихся объектов [1–4]. Большинство классических методов анализируют не сами кадры видеопоследовательности, а оптический поток (поле видимых смещений пикселей изображений), построенный по этим кадрам.

Для сравнительного анализа построим данные методы на базе широко используемой в компьютерном зрении общедоступной библиотеки OpenCV, содержащей реализации для некоторых шагов исследуемых методов, таких как построение оптического потока, вычисление градиента и поиск контуров, а также простой и удобный интерфейс для работы с камерами и вывод результата на экран.

Для построения оптического потока будем использовать функции из библиотеки OpenCV, реализующие алгоритмы Хорна–Шанка (Horn–Schunck) [5, 6], Лукаса–Канадэ (Lucas–Kanade) [6, 7] и метод блочного сопоставления, описанный, в том числе, в работе [8], а также метод, разработанный авторами настоящей работы и представленный в [8].

Для построения контуров движущихся объектов будем выполнять следующие шаги:

- построение оптического потока одним из предложенных выше методов;
- вычисление градиента оптического потока;
- построение матрицы, каждая ячейка которой соответствует модулю градиента;
- нахождение контуров на основе бинаризованного поля модуля градиента.

Общая схема построения областей движущихся объектов будет включать следующие шаги:

- построение оптического потока одним из предложенных выше методов;
- сравнение вектора оптического потока в каждой точке кадра с векторами в соседних точках (сравнение ведется только с точками снизу и справа от текущей точки, поскольку сравнение с точками слева и сверху уже было выполнено при рассмотрении предыдущих точек);
- если векторы сходны, то точки объединяются в область или присоединяются к уже существующей области (для пометок областей их номера записываются в соответствующие ячейки кадра).

Таким образом, после однократного прохода по изображению получим разметку на области.

В качестве функции похожести векторов оптического потока для рассматриваемых методов приемлемый результат дает использования следующего условия. Если модуль разности векторов меньше одной трети длины самого короткого, то вектора похожи. Данный критерий, хотя и выглядит эвристическим, дает хороший результат и является приемлемым при сравнении эффективности разных методов выделения движущихся объектов. Коэффициент эмпирически вытекает из спектра векторов оптического потока. Полное обоснование критерия и автоматический адаптивный выбор коэффициента предполагается получить в последующих работах.

**Анализ характеристик методов выявления движущихся объектов**

Проведем сравнение различных методов выявления движущихся объектов по критериям быстродействия, сложности реализации и качества достигаемого результата. Перечисленные характеристики важны, так как для обеспечения непрерывного видеонаблюдения требуется обработка изображений в масштабе реального времени. Однако достижение необходимого быстродействия не должно приводить к ухудшению вероятностей обнаружения объектов интереса. При всем этом для возможности легкого внедрения метода в любые проекты желательно иметь простую и очевидную реализацию.

**Быстродействие.** Основной вклад в вычислительную сложность рассматриваемых методов вносит вычисление оптического потока, так как даже линейные реализации имеют очень большой коэффициент. Все остальные шаги алгоритмов выделения движущихся объектов – группирование векторов, вычисление градиента, поиск контуров – требуют лишь нескольких операций на каждый пиксель изображения. Данные методы можно назвать весьма производительными, если не брать в расчет вычисление оптического потока, так как способ его вычисления зависит от поставленных задач, условий и целей. К тому же все современные компьютеры имеют несколько ядер, и оптический поток может независимо вычисляться на своем ядре, не мешая остальному анализу. При обработке каждого нового кадра на все прочие расчеты, кроме оптического потока, для стандартного размера кадра (VGA – 64×480) тратится не более 10–60 млн. тактов, что приблизительно равно 4–20 мс процессорного времени для ядра с частотой 3 ГГц. Производительность зависит от интенсивности и сложности движения на видеоряде, поэтому точную алгоритмическую сложность подсчитать не возможно. Например, для неподвижной сцены все алгоритмы дают быстрый ответ об отсутствии объектов, но чем больше в сцене мелких движений, тем больше ресурсов требуется для их поиска. Конечно же, например, для метода объединения областей несложно придумать кадры, оптический поток которых имеет шахматный порядок, и анализ таких кадров будет, как минимум, кубической сложности. Но на практике такое не встречается, а движущиеся объекты имеют сгруппированные области на видеокадрах. Эта сгруппированность сохраняется и для оптического потока, что позволяет его анализировать со скоростью, немного меньшей, чем линейная.

Таким образом, анализируемые методы применимы для использования на обычных компьютерах для обработки видео в реальном масштабе времени.

**Сложности реализаций.** Чем проще метод, тем сложнее в нем сделать неявную ошибку, и тем этот метод надежнее. Особенно это важно, когда метод встраивается как дополнительная функциональность в уже работающую систему.

Использование библиотеки OpenCV позволяет упростить реализацию методов путем написания кода сравнительно небольшого объема. Для всех сложных шагов использовались стандартные функции из библиотеки, что позволяет избежать возможных ошибок при самостоятельной реализации. Для связи сложных шагов производятся только простые операции (например, передача изображений), поэтому их реализация практически очевидна, и в ней сложно допустить ошибку.

Таким образом, анализируемые методы легко реализовать, а значит, они обладают высокой надежностью.

**Качество.** Рассмотренные методы являются приемлемыми по скорости работы, однако необходимо оценить качество получаемого результата. Проведем следующий эксперимент: на вход алгоритмам подадим видеоряд с бытовой видеокамеры. При стандартном комнатном освещении плавно проведем рукой перед камерой. Были опробованы как аналоговые камеры, для оцифровки сигнала которых использовались платы видеозахвата, так и различные WEB-камеры, которые подключаются к компьютеру через интерфейс USB и передают уже оцифрованный сигнал. В ходе экспериментов не выявлено существенных отличий выделяемых объектов в зависимости от использованной камеры. На рис. 1 для одного и того же видеоряда представлен результат работы алгоритмов поиска контура и объединения областей.

Рис. 1. Выделение движущейся руки на основе двух методов: поиск контуров (а); объединение областей (б)

Все сравниваемые методы дают сходный по качеству результат – алгоритмы выделили шумы как движущиеся объекты, что непригодно для дальнейшего использования. Следует заключить, что причина низкого качества результата обусловлена качеством построения оптического потока, поскольку данные методы на нем основаны.

Как подробно описано в [8], большинство алгоритмов построения оптического потока дают приемлемый результат только на искусственных и чистых кадрах, поэтому, получив на вход видео с шумами, они не обеспечивают желаемое качество выделения объекта. Все рассмотренные стандартные методы построения оптического потока очень чувствительны к уровню шумов, что отражается в найденных движущихся объектах. В ряде случаев алгоритмы вычисляют, что движется вся сцена, хотя на самом деле движения нет вообще, а на видео – равномерный шум. Также классические методы имеют сильные ограничения в допустимой скорости движения объектов – движения медленнее, чем один пиксель за кадр, не обнаруживаются вовсе. Разработанный в [8] авторский метод для построения оптического потока более помехоустойчив и способен выделять медленные движения, поэтому его использование для данной задачи дает приемлемое, но не идеальное в целом качество результата (рис. 2).

а б

Рис. 2. Использование авторского метода на шаге построения оптического потока: вычисленный контур (а); вычисленная область (б)

Как видно из рисунка, указанные ранее проблемы построения оптического потока переносятся на методы выделения движущихся объектов.

**Выявленные проблемы**

В основном все классические методы выделения движущихся объектов дают результат на основе анализа только двух последовательных кадров видеоряда, поскольку, как правило, используемый оптический поток строится на их основе. Это приводит к появлению таких проблем, как потеря медленных движений, зависимость от параметров захвата видео, отсутствие учета истории и особенностей искомых движений.

Например, если для камеры на улице захват видео производится со скоростью 8 кадров в секунду и кадры обладают высокой четкостью, то идущий вдалеке человек на уровне пикселей в каждом соседнем кадре имеет различное положение. Но, допустим, захват будет ускорен до 25 кадров в секунду, а размеры кадров маленькие. При этих условиях тот же идущий вдалеке человек, например, может изменять свое положение на уровне пикселей только каждые 4 кадра. Это приводит к большим интервалам между изменением положения. В результате алгоритм, эффективный в первом случае, даст не удовлетворительный результат во втором случае. Тем не менее, параметры захвата изменяются крайне редко, и обычно используется то, что дается по умолчанию. Стоит отметить, что во втором случае изменение положения происходит через 200 мс и, например, человеческий мозг осознает это как плавное и равномерное движение, вне зависимости от качества кадров и скорости их смены.

Таким образом, выбор условий съемки и настроек очень важны для многих алгоритмов. Отлично работая в одних условиях, почти все алгоритмы полностью перестают работать в других условиях.

Обычно алгоритмы не анализируют никакие закономерности естественных движений. Например, движение, которое появилось на двух или трех кадрах, скорее всего – шум, и выявлять его нет необходимости. То же самое можно сказать и про резкие движения вперед–назад, часто возникающие при съемках в затемненных условиях и связанные с особенностями захватывающей видеоаппаратуры. В таких условиях на видеокадрах присутствует большое количество шумов, и алгоритмы либо вообще перестают работать, либо указывают «перемещения» шумов. Тем не менее, практически всегда задача поиска движущихся объектов требует выделить движения настоящих объектов, а не формально указать движения пикселей на кадрах.

**Обсуждение**

На основе полученных выше результатов обоснована необходимость создания более универсального (по сравнению с существующими) алгоритма для выделения движущихся объектов в видеопоследовательности. Предположительно хороший результат должно дать использование идей из работы [8], но

примененных не к построению одного только оптического потока, а также и к задаче поиска движущихся объектов. Корневым отличием алгоритма должен стать анализ более чем двух кадров для получения решения на каждом отдельном кадре. Данная особенность должна быть использована для поиска закономерностей траектории объекта на группе смежных кадров и выявления медленных движений, а не потери объекта, если он остановился на нескольких кадрах. Должно присутствовать отсечение неестественных движений, которые в большинстве случаев являются шумом или событиями, которые не представляют интереса. Также алгоритм не должен зависеть от скорости смены кадров и одинаково хорошо работать в различных условиях.

При этом весь процесс должен быть связанным, а не строить решение по любым нескольким кадрам. На практике видеопоследовательность, в которой от алгоритма требуется найти движущиеся объекты, никогда не является случайной, а наоборот, она всегда представляет собой очень сильно связанные данные. Бессмысленно искать движущиеся объекты в последовательности изображений, в которых нет общих частей. Например, на записях камер видеонаблюдения всегда есть неизменный фон, на который можно опираться, чтобы получить устойчивость к шумам, которые присутствуют всегда при записи и оцифровке видеоматериала.

Таким образом, опираясь на хорошие результаты, полученные при анализе нескольких последовательных кадров для построения оптического потока в статье [8], можно предложить идеи для создания универсального метода выделения движущихся объектов. Анализ должен производиться на нескольких масштабах, и переход к более крупному изображению должен использовать результаты, полученные на предыдущем масштабе. Исходя из этого, должно происходить уточнение результата при детализации изображения. Для поиска решения должен использоваться просмотр нескольких соседних кадров, это даст возможность отследить медленные движения и проигнорировать шумы. Создание и детальное исследование этого метода будет выполнено в будущих работах авторов.

## Заключение

Рассмотрены основные методы выделения движущихся объектов. Произведен их сравнительный анализ и проверено, что все они достаточно быстрые, чтобы использоваться в системах реального времени, а так же их не сложно реализовать и встроить в уже существующие проекты. Но выяснилось, что все классические методы практически невозможно использовать для анализа реальных видеопоследовательностей, полученных с бытовых камер, потому что методы не предполагают наличие шумов на кадрах. Предложены пути для решения этой проблемы. Ключевой особенностью станет использование более двух последовательных кадров для анализа и выдачи ответа на каждом отдельном кадре.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки и Совета по грантам Президента Российской Федерации (грант МД-2040.2010.9).

## Литература

1. Лукьяница А.А. Цифровая обработка видеоизображений / А.А. Лукьяница, А.Г. Шишкин. – М.: Ай-Эс-Си Пресс, 2009. – 518 с.
2. Казаков Б.Б. Эффективные методы выделения движения объектов в последовательности изображений / Б.Б. Казаков // Научно-технические ведомости СПб ГПУ. Сер. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2009. – Вып. 5. – С. 55–60.
3. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Методы обработки и анализа изображений в бортовых системах обнаружения и сопровождения объектов // Цифровая обработка сигналов. – 2006. – № 2. – С. 45–51.
4. Алпатов Б.А., Бабаян П.В. Выделение движущихся объектов в последовательности мультиспектральных изображений при наличии геометрических искажений // Вестник РГРТУ. – 2008. – Вып. 23. – С. 30–37.
5. Horn B.K.P., Schunck B.G. Determining optical flow // Artificial Intelligence. – 1981. – V. 17. – P. 185–203.
6. Bouguet J.Y. Pyramidal Implementation of the Lucas Kanade Feature Tracker Description of the algorithm // OpenCV Documentation, Microprocessor Research Labs, Intel Corp, 2000.
7. Bruhn A., Weickert J., Schnorr C. Lucas/Kanade Meets Horn/Schunck: Combining Local and Global Optic / // International Journal of Computer Vision 61. – 2005. – V. 3. – P. 211–231.
8. Козлов В.А. Помехоустойчивый метод построения оптического потока по нескольким кадрам // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77. – № 11. – С. 63–68.

***Козлов Вадим Андреевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, vadikus@mail.ru

***Потапов Алексей Сергеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, pas.aicv@gmail.com

# 3 АНАЛИЗ И СИНТЕЗ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

**УДК 681.5**

## ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ НЕПРЕРЫВНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

**С.В. Быстров, В.В. Григорьев, Е.Ю. Рабыш, Н.А. Черевко**

Рассмотрен аналитический алгоритм синтеза оптимальных регуляторов, обеспечивающих синтезируемой непрерывной нестационарной динамической системе экспоненциальную устойчивость, т.е. возможность задания желаемого времени переходных процессов.

**Ключевые слова:** экспоненциальная устойчивость, конструирование оптимальных регуляторов, непрерывные нестационарные системы, показатели качества.

### Введение

Для оценки качества переходных процессов в системах с одним входом и одним выходом широкое распространение в инженерной практике получили показатели качества, вводимые по переходной функции, т.е. по реакции системы на единичное ступенчатое воздействие при нулевых начальных условиях. Такие показатели качества процессов, как время переходного процесса и перерегулирование, достаточно полно отражают физические процессы, происходящие в системе, и позволяют сравнивать динамические свойства различных систем. Однако вводимые по переходной функции показатели качества не применимы непосредственно к многомерным системам. Множество траекторий в пространстве выходов многомерной системы, вызванных воздействиями, приложенными к различным входам, может состоять из существенно разнящихся визуально кривых. На множестве таких кривых утрачивается очевидность их сравнения, а следовательно, и сопоставимость динамических свойств различных систем. Аналог переходной функции для линейных непрерывных многомерных систем введен в [1]. Дальнейшее развитие подобного подхода нашло отражение во введении понятия совокупной переходной функции. Для этого вводится понятие нормированной совокупной переходной функции многомерной системы [2, 3], по которой, как и для систем с одним входом и одним выходом, определяются типовые показатели качества в виде времени переходного процесса и перерегулирования. Причем эти показатели качества определяются по множеству траекторий, исходящих из области допустимых начальных значений. Чтобы избежать при нахождении значений показателей качества большого объема вычислений, вызванного необходимостью выявления наихудших случаев по нормированию совокупных переходных функций, соответствующих исследуемому множеству траекторий, проще производить оценку показателей качества. В связи с этим в дальнейшем на основе условий экспоненциальной устойчивости были получены показатели качества в виде времени переходного процесса для непрерывных и дискретных динамических систем. Но следует отметить, что лишь для дискретных динамических систем по полученным показателям качества были разработаны алгоритмы синтеза оптимальных регуляторов, обеспечивающие экспоненциальную устойчивость [2].

### Постановка задачи

Современная теория линейных систем автоматического управления основана на использовании метода пространства состояний. Среди различных направлений основанный на нем метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов является одним из самых распространенных [4–7]. Беллман, касаясь задачи аналитического конструирования оптимальных регуляторов, отмечал, что данной «менее важной задачей» часто заменяют исходную, «более реалистичную задачу» оптимизации, и подчеркивал: «Это напоминает историю об одном человеке, который, потеряв кольцо посреди улицы, искал его под фонарем, потому что там светлее», хотя оно «оставалось в той непроглядной темноте, которая показалась слишком затруднительной для поисков».

Предположим, что поведение динамической системы описывается дифференциальным уравнением

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t), \qquad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния динамической системы; $x(0) = x_0 \in R^n$ – вектор начальных состояний; $u \in R^m$ – управление; $A$ – $n \times n$ матрица описания; $B$ – $n \times m$ матрица входа; $t \geq 0$ – время. Полагая, что объект управления (1) является полностью управляемым, рассмотрим задачу нахождения такого закона управления, который обеспечивает для замкнутой системы экспоненциальную устойчивость с заданными значениями параметров, определяемыми по требуемым значениям времени переходных процессов.

### Стабилизация нестационарных непрерывных динамических систем

Наиболее сильные притягивающие свойства положения равновесия динамической системы обеспечиваются при условии экспоненциального затухания переходных процессов [2, 3].

При изучении условия экспоненциальной устойчивости будем полагать, что при любых $x_0 \in R^n$ решение $x \in R^n$ уравнения (1) существует и единственно, а система является полной в $R^n$, т.е. под этим условием понимается глобальная экспоненциальная устойчивость динамической системы. Далее дадим определение экспоненциальной устойчивости [3].

**Определение 1.** Непрерывная система (1) в точке $x = 0$ называется экспоненциально устойчивой, если для любых траекторий движения системы, исходящих из произвольных начальных условий $x_0 \in R^n$, существуют такие параметры $\rho : \rho \geq 1$ и $\lambda : \lambda < 0$, при которых в любой момент времени $t \geq 0$ выполняется условие

$$\|x(t)\| \leq \rho \cdot e^{\lambda \cdot t} \|x_0\|, \tag{1}$$

где норма вектора задается соотношением

$$\|x\| = \left[ \sum_{i=1}^{n} |x_i|^2 \right]^{1/2},$$

где $x_i$ – $i$-ая компонента вектора состояния $x$.

Неравенство (2) устанавливает экспоненциальную мажоранту процессов, которая может служить для оценки качества непрерывной системы в некоторой окрестности ее положения равновесия.

Из определения экспоненциальной устойчивости непрерывной динамической системы можно получить оценку времени переходного процесса [3]:

$$t_n \leq \frac{1}{\lambda} \ln(\delta_n), \tag{3}$$

где $\delta_n \leq 0{,}05$.

Для линейных систем (1) подлежит минимизации квадратичный критерий качества:

$$J(x,u) = \int_0^{\infty} \left[ x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t) \right] dt, \tag{4}$$

где $Q = Q^T$ – положительно полуопределенная $n \times n$ матрица штрафов по отклонениям траекторий движения системы от положения равновесия; $R = R^T$ – положительно определенная $m \times m$ матрица штрафов по управлению. Управление $u$ в задаче (1), (4) ищется в виде

$$u(t) = -K(t) x(t), \tag{5}$$

удовлетворяющее условию (2). Здесь $K(t)$ – $m \times n$ матрица линейных обратных связей по состояниям объекта управления. Для решения задач (1), (4) необходимо построить функцию $V(x(t))$, которую в рассматриваемом случае естественно искать в виде квадратичной формы:

$$V(x(t)) = x^T(t) P(t) x(t), \tag{6}$$

где $P = P^T$ – положительно определенная $n \times n$ матрица.

Теперь дадим локальные достаточные условия экспоненциальной устойчивости [3].

**Теорема 1.** Непрерывная система (1) экспоненциально устойчива в точке $x = 0$, если существуют такая квадратичная функция Ляпунова $V(x(t))$ и такой параметр $\lambda : \lambda < 0$, при которых на всех траекториях движения системы в любой момент времени $t \geq 0$ выполняется условие

$$\dot{V}(x(t)) \leq 2\lambda V(x(t)). \tag{7}$$

Условие (7) имеет место, если справедливо уравнение

$$\dot{V}(x(t)) - 2\lambda V(x(t)) = -x^T(t) Q(t) x(t) - u^T(t) R(t) u(t), \tag{8}$$

подставив квадратичную функцию Ляпунова (6) и ее производную в уравнение (8), получим:

$$\left[ A(t)x(t) + B(t)u(t) - \lambda x(t) \right]^T P(t) x(t) + x^T(t) P(t) \left[ A(t)x(t) + B(t)u(t) - \lambda x(t) \right] + x^T(t) \dot{P}(t) x(t) +$$
$$+ x^T(t) Q(t) x(t) + u^T(t) R(t) u(t) = 0, \tag{9}$$

на основе которого, воспользовавшись методом локальной оптимизации [3], находим оптимальное управление:

$$u(t) = R^{-1}(t) B^T(t) P(t) x(t). \tag{10}$$

Таким образом, используя (4), (8), (9), получим систему матричных уравнений типа Риккати:

$$\dot{P}(t) + \left[ A(t) - B(t)K(t) - \lambda I \right]^T P(t) + P(t) \left[ A(t) - B(t)K(t) - \lambda I \right] + K^T(t) R(t) K(t) + Q(t) = 0, \tag{11}$$

$$K(t) = R^{-1}(t) B^T(t) P(t), \tag{12}$$

где $I$ – единичная матрица. Если все матрицы $A, B, Q, R$ постоянны, то процесс может достичь установившегося состояния в том смысле, что становится постоянной матрица $P$ ( $\dot{P} = 0$ ):

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t),$$

$$[A - BK - \lambda I]^T P + P[A - BK - \lambda I] + K^T RK + Q = 0, \quad (13)$$

$$K = R^{-1} B^T P. \quad (14)$$

На основании теоремы 1 существование положительно определенного решения системы уравнений (13), (14) является достаточным условием устойчивости синтезируемой матрицы замкнутой системы:

$$\mathrm{Re}\,\lambda_i\{F - \lambda I\} < 0,\ i = 1, 2, ..., n,$$

и, следовательно, получения степени устойчивости системы:

$$\mathrm{Re}\,\lambda_i\{F\} < \lambda,\ i = 1, 2, ..., n.$$

В заключение рассмотрим последовательность синтеза регулятора для обеспечения экспоненциальной устойчивости синтезируемой непрерывной нестационарной динамической системе с исходными данными – в общем случае управляемым нестационарным объектом управления с матрицами описания $A(t)$ и входа $B(t)$:

1. по заданным оценкам времени переходного процесса определение значения параметра $\lambda$ по (3);
2. решение системы матричных уравнений типа Риккати (11), (12) относительно матрицы $P(t)$ с последующим вычислением матрицы линейных обратных связей $K(t)$ по (12).

В качестве примера рассмотрим непрерывный стационарный объект управления

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t), y(t) = Cx(t)$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 5 \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} 0 \\ 4 \end{bmatrix}; C = \begin{bmatrix} 1 & 1 \end{bmatrix}$$

со следующими заданными показателями качества:

$$t_n = 3{,}0\ \text{с}; \delta_n = 0{,}01.$$

В общем случае, предполагая, что все переменные вектора состояния объекта управления доступны для измерения, управление ищется как функция состояний объекта управления в виде

$$u = -Kx.$$

Взяв параметры

$$Q = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; R = 1$$

и решив матричные алгебраические уравнения (13), (14), получим матрицы обратных связей $K$ регуляторов при $\lambda = -1{,}535$ (вычисляемая по (2) и обеспечивающая экспоненциальную устойчивость) и при $\lambda = 0$ (обеспечивается асимптотическая устойчивость) соответственно:

$$K_1 = [6{,}194 \quad 4{,}035].$$

$$K_2 = [2{,}447 \quad 1{,}856].$$

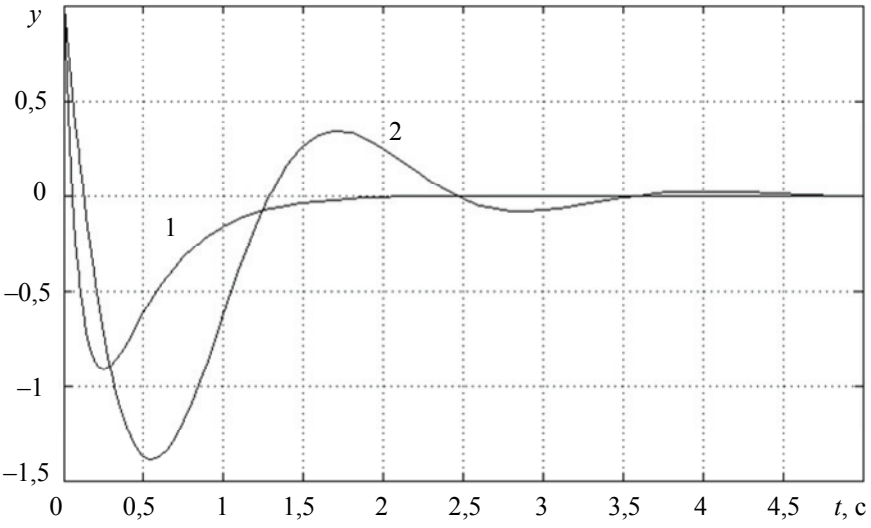



Рисунок. Переходные процессы при $x_0^T = [1 \quad 0]$: 1 – в экспоненциально устойчивой системе; 2 – в асимптотически устойчивой системе

На рисунке показаны графики переходных процессов при $x_0^T = [1 \quad 0]$, из которых явно видно, что на переходном процессе 1 (в отличие от переходного процесса 2), который получается при использовании условий экспоненциальной устойчивости, удовлетворяется желаемое время переходного процесса, что и подтверждает полученные результаты.

### Заключение

На основе достаточных условий экспоненциальной устойчивости, метода локальной оптимизации и оценки времени переходного процесса получен алгоритм синтеза оптимальных регуляторов, обеспечивающий синтезируемой непрерывной нестационарной динамической системе экспоненциальную устойчивость.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 09-08-00857-а «Методология применения теории качественной устойчивости при проектировании систем управления адаптивной оптикой»).

### Литература

1. Соболев О.С. Однотипные связанные системы регулирования. – М.: Энергия, 1973.– 136 с.
2. Григорьев В.В., Дроздов В.Н., Лаврентьев В.В., Ушаков А.В. Синтез дискретных регуляторов при помощи ЭВМ. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отделение, 1983. – 245 с.
3. Григорьев В.В. Аналитический синтез регуляторов на основе качественной устойчивости [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01/ В.В. Григорьев. ЛИТМО. – Л.: [б.н.], 1988.– 483 с.
4. Афанасьев В.Н., Колмановский В.Б., Носов В.Р. Математическая теория конструирования систем управления. – М.: Высшая школа, 2003.– 447 с.
5. Мирошник И.В. Теория автоматического управления. Нелинейные и оптимальные системы. – СПб: Питер, 2006.– 272 с.
6. Фурасов В.Д. Устойчивость движения, оценки и стабилизация. – М.: Наука, 1978.– 248 с.
7. Красовский А.А., Буков В.Н. и Шендрик В.С. Универсальные алгоритмы оптимального управления непрерывными системами. – М.: Наука, 1977.– 272 с.

***Быстров Сергей Владимирович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, sbystrov@mail.ru

***Григорьев Валерий Владимирович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, grigvv@yandex.ru

***Рабыш Евгений Юрьевич*** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, Rabysh@yandex.ru

***Черевко Николай Александрович*** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, epostbox1@mail.ru

**УДК 62-83::621.313.2**

# УПРАВЛЕНИЕ СКОРОСТЬЮ И МОМЕНТОМ ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ В ПРИВОДЕ ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

**А.Д. Громышева, И.Е. Овчинников, А.В. Егоров**

Рассматриваются автоколебательные процессы для скорости и тока, возникающие при релейном управлении вентильным двигателем с линейной обратной связью по скорости ротора и току статора. Показана возможность обеспечения плавного регулирования средней скорости и момента при большой жесткости искусственной механической характеристики и ограничении тока в переходных режимах.

**Ключевые слова:** вентильный двигатель, релейный регулятор, привод, скорость, момент.

### Введение

Для управления легким транспортным средством типа заводских электрокаров, электровелосипедов, инвалидных колясок и т.д. наилучшим приводным двигателем является вентильный двигатель (ВД), обладающий механическими и регулировочными характеристиками, близкими к таковым для двигателя постоянного тока независимого возбуждения, но лишенный скользящих электрических контактов и имеющий более высокий КПД [1].

Для управления двигателем в составе рассматриваемого привода целесообразно использовать наиболее простую, эффективную по быстродействию, простоте реализации и стоимости схему релейного регулятора, включенного в слаботочную цепь датчика положения ротора [2].

### Управление скоростью

Структурная схема рассматриваемого привода показана на рис. 1. На элемент сравнения $C_\omega$ подается сигнал управления $U_y$, который определяет заданный уровень установленной скорости $\Omega_y$. Этот сиг-

нал сравнивается с сигналом обратной связи тахогенератора ТГ $k\Omega$, пропорциональным фактической скорости двигателя $\Omega$. Разность сигналов $\sigma_\omega = U_y - k\Omega$ подается на логическую схему «И».

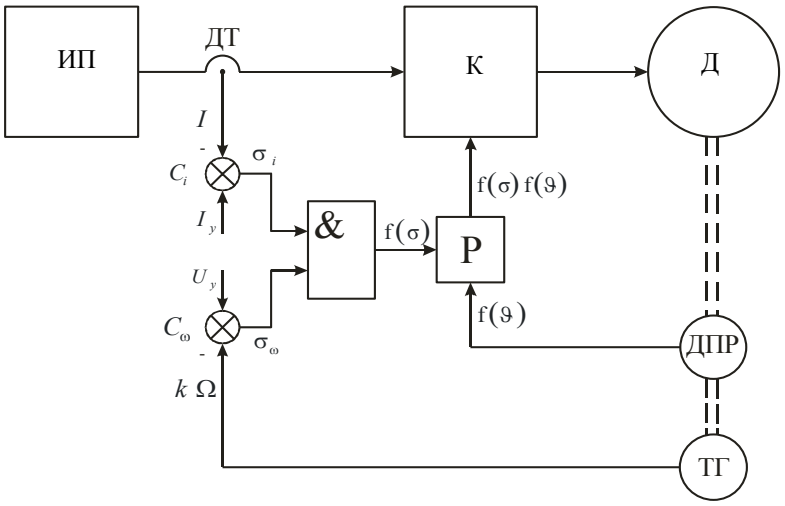



Рис. 1. Структурная схема регулирования скорости: ИП – источник питания; К – полупроводниковый коммутатор; Д – двигатель; ДПР – датчик положения ротора; ТГ – тахогенератор; ДТ – датчик тока; & – логическая система «И»; $C_i$ – элемент сравнения по току; $C_\omega$ – элемент сравнения по скорости

На второй элемент сравнения $C_i$ подается сигнал установки $I_y$, определяющий максимально допустимый ток, который может «пропустить» полупроводниковый коммутатор К, питающий двигатель Д. Этот ток сравнивается с фактическим входным током коммутатора $I$, и результат в виде сигнала $\sigma_i = I_y - I$ подается на управляющую схему «И». На выходе схемы «И» вырабатывается единичная функция f(σ), удовлетворяющая условию:

$$\begin{aligned} &f(\sigma) = 1, \text{ если } \sigma_\omega \cdot \sigma_i \geq 0; \\ &f(\sigma) = 0, \text{ если } \sigma_\omega \cdot \sigma_i \leq 0. \end{aligned} \qquad (1)$$

Управляющая функция f(σ) воздействует на бесконтактное реле Р, включенное в слаботочную (10–100 мА) цепь положения ротора ДПР. Если f(σ) = 1, то реле Р включается, и сигнал с ДПР подается на коммутатор К и включает необходимую группу силовых транзисторов, обеспечивающих питание соответствующих фаз двигателя. Если f(σ) = 0, то реле Р отключается, сигнал прерывается, и двигатель отключается от источника.

На рис. 2 при пуске точка А двигается из положения $A_0$ вдоль линии безразмерного тока $i_y = \dfrac{I_y}{I_\text{п}}$ до пересечения с естественной механической характеристикой $\omega = f(\mu)$. Здесь использованы безразмерные величины – скорость $\omega = \dfrac{\Omega}{\Omega_0}$ и момент $\mu = \dfrac{M}{M_\text{п}}$, где $\Omega_0$ и $M_\text{п}$ – скорость идеального холостого хода и пусковой момент соответственно.

После выхода на естественную характеристику в $A_1$ точка движется по ней в положение $A_2$. Это значит, что f(σ) = 1. Из точки $A_2$ по горизонтальной искусственной характеристике точка переходит в положение $A_3$, соответствующее моменту нагрузки на валу $\mu_\text{н}$, где:

$\sigma_\omega = U_y - k\Omega \geq 0$, f(σ) = 1 – двигатель включен, скорость Ω возрастает;

$\sigma_\omega = U_y - k\Omega \leq 0$, f(σ) = 0 – двигатель отключен, скорость Ω уменьшается.

Поддержание скорости Ω = const на участке искусственной механической характеристики $A_2A_3$ осуществляется в импульсном режиме включения – отключения реле Р. В совокупности с логической схемой &, реле (рис. 1) имеет некоторый гистерезис. Петля гистерезиса характеризуется сигналом включения $\sigma_1 = U_y - k\Omega_1$ и сигналом отключения $\sigma_2 = U_y - k\Omega_2$.

В системе устанавливается импульсный режим автоколебаний скорости, тока и момента двигателя, в котором период колебаний $T$ зависит от внутренних параметров системы, таких, как зона гистерезиса $\Delta\sigma = \sigma_1 - \sigma_2$, электромагнитная постоянная обмотки $T_e$, механическая постоянная двигателя $T_m$, а также от нагрузки $M_\text{н}$.

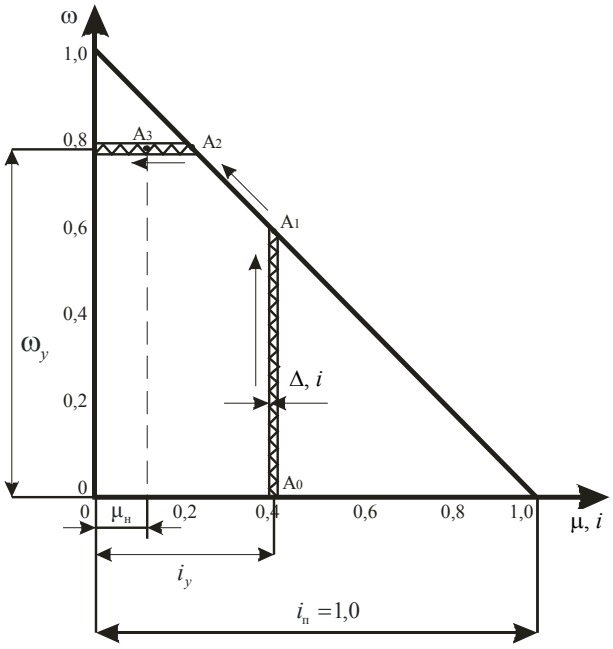



Рис. 2. Механическая характеристика двигателя

На рис. 3 изображен импульсный автоколебательный режим, где импульсная функция f(σ) характеризуется длительностью включения $t_1$ и периодом $T$.

Ток двигателя $i$ в импульсном режиме колеблется в пределах $i(0) \le i \le i(t_1)$, где $i(0)$; $i(t_1)$ – ток в начале и конце импульса соответственно. Предполагается, что внутри периода $T$, ток $i(0)$ не принимает нулевого значения [2]. Нижняя диаграмма рис. 3 показывает изменение безразмерной скорости ω в режиме автоколебаний. Верхняя диаграмма показывает гистерезис.

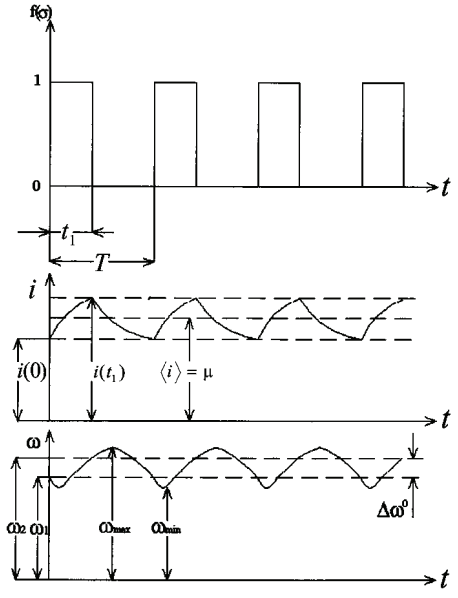



Рис. 3. Импульсный автоколебательный режим

В [3] показано, что для импульсного режима непрерывного тока характерно соотношение:

$$\omega^0 = \tau_1 - \mu_н, \qquad (2)$$

где $\omega^0$ – средняя безразмерная (относительная) скорость двигателя; $\tau = \frac{t_1}{T}$ – относительная продолжительность включенного состояния; $\mu_н$ – безразмерный (относительный) момент нагрузки, который далее будет предполагаться независимым от нагрузки.

Условие непрерывного тока в [2] формулируется в следующем виде:

$$\mu_н = \frac{1}{2\varepsilon}(\omega^0 + \mu_н)(1 - \omega^0 - \mu_н)\ , \tag{3}$$

где $\varepsilon = \dfrac{T_e}{T}$ – величина периода автоколебаний; $T$ – искомая величина.

Запишем уравнения равновесия напряжения на обмотке двигателя и уравнения моментов:

$$\begin{aligned} &T_e \frac{di}{dt} + i = 1 - \omega^0, \quad \text{при } 0 \le t \le t_1; \\ &T_e \frac{di}{dt} + i = -\omega^0, \quad \text{при } t_1 \le t \le T. \end{aligned} \tag{4}$$

Уравнение динамики на периоде $T$ записывается в виде

$$T_m \frac{d\omega}{dt} = i - \mu_н. \tag{5}$$

Решая первое из двух уравнений (4) и подставляя туда время $t_{\min}$, соответствующее скорости $\omega_{\min}$, имеем условие экстремума для скорости $\omega_{\min}$:

$$\frac{d\omega}{dt} = i_1(0) \cdot e^{\frac{-t_{\min}}{T_e}} + (1 - \omega^0)(1 - e^{\frac{-t_{\min}}{T_e}}) - \mu_н.$$

Отсюда

$$t_{\min} = T_e \ln \frac{1 - \omega^0 - i(0)}{1 - \omega^0 - \mu_н}. \tag{6}$$

Аналогично для условия максимума скорости, решая второе уравнение (4), имеем

$$t_{\max} = t_1 + T_e \ln \frac{\omega^0 + i(t_1)}{\omega^0 + \mu_н}.$$

Из (5) находим минимальное и максимальное значения скорости на периоде $T$:

$$\omega_{\min} = \omega_1 - \frac{T_e}{T_m}\left( \left(\mu_н - i(0)\right) - \left(1 - \omega^0 - \mu_н\right) \ln \frac{1 - i(0) + \omega^0}{1 - \omega^0 - \mu_н} \right);$$

$$\omega_{\max} = \omega_2 + \frac{T_e}{T_m}\left( \left(i(t_1) - \mu_н\right) - \left(\omega^0 + \mu_н\right) \ln \frac{i(t_1) + \omega^0}{1 + \mu_н} \right).$$

Фактическое среднее значение скорости, определяемое гистерезисным «коридором», равно

$$[\omega] = \omega^0 - \frac{T_e}{T_m}\left( \mu_н - \frac{i(0) + i(t_1)}{2} + \frac{\omega^0 + \mu_н}{2} \ln \frac{i(t_1) + \omega^0}{\omega^0 + \mu_н} - \frac{1 - \omega^0 - \mu_н}{2} \ln \frac{1 - \omega^0 - i(0)}{1 - \omega^0 - \mu_н} \right). \tag{7}$$

Согласно [3], токи в начале и конце импульса будут равны

$$i(0) = \frac{e^{\frac{\tau_1}{\varepsilon}} - 1}{e^{\frac{1}{\varepsilon}} - 1};\ i(t_1) = \frac{1 - e^{\frac{-\tau_1}{\varepsilon}}}{1 - e^{\frac{-1}{\varepsilon}}} - \omega^0. \tag{8}$$

Полагая $\varepsilon = \dfrac{T_e}{T} \ge 1$, что важно с точки зрения режима непрерывных токов (3), можно, разложив в показательные функции в ряд, записать

$$e^{\frac{\tau_1}{\varepsilon}} \approx 1 + \frac{\tau_1}{\varepsilon} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2;\ e^{\frac{1}{\varepsilon}} \approx 1 + \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2;\ e^{\frac{-\tau_1}{\varepsilon}} \approx 1 - \frac{\tau_1}{\varepsilon} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2;\ e^{\frac{-1}{\varepsilon}} \approx 1 - \frac{1}{\varepsilon} + \frac{1}{2}\left(\frac{1}{\varepsilon}\right)^2. \tag{9}$$

С учетом (9) получим выражение для токов (8):

$$i(0) \approx \tau_1\left(1 - \frac{1}{2\varepsilon} + \frac{\tau_1}{2\varepsilon} - \frac{\tau_1}{4\varepsilon^2}\right) - \omega^0;\ \ i(t_1) \approx \tau_1\left(1 + \frac{1}{2\varepsilon} - \frac{\tau_1}{2\varepsilon} - \frac{\tau_1}{4\varepsilon^2}\right) - \omega^0. \tag{10}$$

В результате упрощений (7) приходим к следующему выражению:

$$[\omega] = \omega^0 - \frac{\tau_1}{4\varepsilon^2}\frac{T_e}{T_m} = \omega^0 - \frac{t_1^2}{4T_eT_m}. \tag{11}$$

С ростом момента нагрузки на валу возрастает длительность включенного состояния $t_1$ и несколько уменьшается средняя скорость $[\omega]$.

Далее свяжем нагрузку на валу $M_н$ с величиной включенного состояния $t_1$ и периодом автоколебаний $T$.

Подставив в правую часть (5) решение для тока из (4) и произведя интегрирование с заменой $\frac{t_1}{T_e} = \frac{t_1}{T}\frac{T}{T_e} = \frac{\tau_1}{\varepsilon}$, получим период автоколебаний в системе с релейным регулятором скорости, равный

$$T = \sqrt{\frac{2\Delta\omega^0 T_m T_e}{(\omega^0+\mu_н)(1-\omega^0-\mu_н)}}. \qquad (12)$$

Подставим в (12) приращение скорости $\Delta\omega^0$, обусловленное наличием зоны гистерезиса реле. Поскольку $\Delta\sigma = k\Omega_2 - k\Omega_1$, то разделив обе части равенства на базовую скорость $\Omega_0$ (скорость идеального холостого хода двигателя), получим $\Delta\omega^0 = \frac{\Delta\sigma}{k\Omega_0}$. Подставив значение $\Delta\omega^0$ в (12), будем иметь выражения для периода и частоты автоколебаний:

$$T = \sqrt{\frac{2\Delta\sigma T_m T_e}{k\Omega_0(\omega^0+\mu_н)(1-\omega^0-\mu_н)}}\ \text{(с)},\ f = \frac{1}{T}\ \text{(Гц)}. \qquad (13)$$

Заметим, что

$$t_1 = \tau_1 T = (\omega^0+\mu_н)T = \sqrt{\frac{2\Delta\sigma T_m T_e(\omega^0+\mu_н)}{k\Omega_0(1-\omega^0-\mu_н)}}. \qquad (14)$$

С учетом (14) искусственная механическая характеристика (11) в режиме поддержания средней скорости будет иметь вид

$$[\omega] = \omega^0 - \Delta\omega;\ \ \Delta\omega = \frac{1}{2}\frac{\Delta\sigma(\omega^0+\mu_н)}{k\Omega_0(1-\omega^0-\mu_н)}.$$

Проверим теперь условие непрерывности токов (3) в автоколебательном режиме. Из (3) следует неравенство

$$\varepsilon = \frac{T_e}{T} \ge \frac{(\omega^0+\mu_н)(1-\omega^0-\mu_н)}{2\mu_н},$$

откуда получаем

$$T \le \frac{2T_e\mu_н}{(\omega^0+\mu_н)(1-\omega^0-\mu_н)}. \qquad (15)$$

Подставив в (15) период $T$ из (13), получаем условие непрерывности тока

$$\frac{\mu_н}{\sqrt{(\omega^0+\mu_н)(1-\omega^0-\mu_н)}} \ge \sqrt{\frac{T_m\Delta\sigma}{2k\Omega_0 T_e}}.$$

Теперь исследуем случай, когда величина периода $T$ по формуле (13) оказывается настолько большой, а величина $\varepsilon = \frac{T_e}{T}$ – настолько малой, что разложением $e^{\frac{1}{\varepsilon}}, e^{\frac{\tau}{\varepsilon}}$ в степенной ряд с сохранением 2–3 членов (9) пользоваться нельзя:

$$\omega_2 - \omega_1 = \Delta\omega^0 = \frac{T_e}{T_m}(i(0)-1+\omega^0)(1-e^{\frac{-t_1}{T_e}}) + (1-\omega^0-\mu_н)\frac{t_1}{T_e}.$$

Подставим сюда $i(0)$ из (10), введем параметр $\varepsilon$, а также заменим $\Delta\omega = \frac{\Delta\sigma}{k\Omega_0}$ и $\frac{t_1}{T} = \tau_1 = \omega^0+\mu_н$. В результате получим уравнение относительно $\varepsilon$:

$$\frac{\Delta\sigma}{k\Omega_0}\frac{T_m}{T_e} = \frac{(1-e^{\frac{-\tau_1}{\varepsilon}})(1-e^{\frac{-(1-\tau_1)}{\varepsilon}})}{1-e^{\frac{-1}{\varepsilon}}} + \frac{\tau_1(1-\tau_1)}{\varepsilon}.$$

Решив это уравнение, найдем $\varepsilon$, а затем и период. Искусственная механическая характеристика может быть построена по уравнению (7) с учетом выражения для токов $i(0)$, $i(t_1)$ из (8). Таким образом, минимальный момент $\mu_н^{\min}$ определяется из уравнения

$$\mu_н^{\min} = \frac{B^2}{2}\left(1-2\omega^0+\sqrt{\left(1-\omega^0\right)^2+\frac{4}{B^2}\omega^0\left(1-\omega^0\right)}\right),$$

где $B^2 = \frac{A^2}{1+A^2}$; $A = \sqrt{\frac{T_m \Delta\sigma}{2k\Omega_0 T_e}}$. Таким образом, при построении искусственной механической характеристики моменты нагрузки следует выбирать в интервале $\mu_н^{min} \le \mu_н \le \mu_н^{max}$, где $\mu_н^{max} \approx 1 - \omega^0$.

**Управление моментом**

На рис. 4 сигнал управления током (моментом) $I_y^0$ проходит через блок ограничения сигнала ОС, который предотвращает появление на его выходе сигнала, большего, чем допустимый ток двигателя $I_{max}$. На рисунке ИП – источник питания; К – полупроводниковый коммутатор; Д – двигатель; ДПР – датчик положения ротора; Ф – реле-формирователь; Р – реле $\varepsilon$.

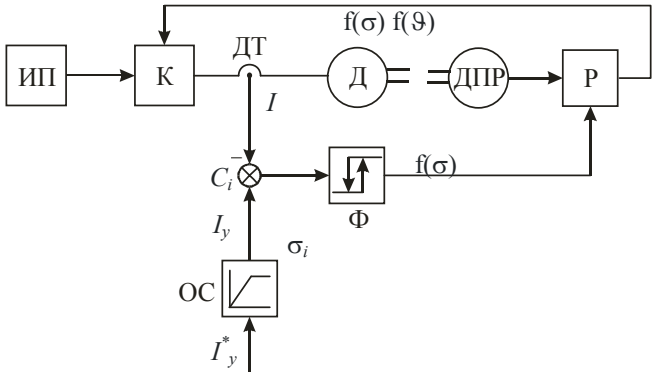



Рис. 4. Схема регулирования момента

Сигнал $I_y$ сравнивается с фактическим током двигателя $I$, и разность сигналов $\sigma_i = I_y - I$ воздействует на реле-формирователь Ф, вырабатывающий управляющую функцию f(σ) = 1, при $\sigma_i \le \sigma_1$ и f(σ) = 0 при $\sigma_i \le \sigma_1$. Далее импульсное управление двигателем с помощью реле осуществляется так, как это было описано выше при объяснении принципа работы схемы на рис. 1.

Параметры установившихся автоколебательных режимов поддержания токов двигателя могут быть определены таким же способом, как это было сделано для стабилизации скорости ω.

Гистерезис реле приводит к колебаниям тока в границах гистерезисного коридора $\Delta i = i(t_1) - i(0)$ (рис. 2). Подставляя сюда токи $i(t_1)$, $i(0)$ из (8), придем к следующему уравнению:

$$\Delta i = \frac{(1 - e^{\frac{-\tau_1}{\varepsilon}})(1 - e^{\frac{-(1-\tau_1)}{\varepsilon}})}{1 - e^{\frac{-1}{\varepsilon}}}; \quad \tau_1 = \omega^0 + \mu_н = \omega^0 + \bar{k}(\omega^0)^\alpha .$$

**Заключение**

Управление ВД с помощью релейного регулятора при надлежащем выборе параметров является достаточно эффективным средством в решении задачи регулирования и стабилизации скорости, и момента двигателя.

**Литература**

1. Леонтьев А.Г. Вентильные двигатели [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.unilib.neva.ru/dl/059/CHAPTER5/Chapter5.html 5.4, своб.
2. Овчинников И.Е., Лебедев Л.Н. Бесконтактные двигатели постоянного тока. – Л.: Наука, 1979.
3. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе. – СПб: Корона-Век, 2006. – 336 с.

***Громышева Анастасия Дмитриевна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, sinderella88@mail.ru

***Овчинников Игорь Евгеньевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, oveni77@yandex.ru

***Егоров Алексей Владимирович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, alexeykey@rambler.ru

**УДК 536.6**

# СЕНСОРЫ НЕСТАЦИОНАРНОЙ ТЕПЛОМЕТРИИ И ИХ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ

**Н.В. Пилипенко**

Рассмотрены основные направления и объекты прикладной теплометрии, приведены математические модели преобразователей нестационарного теплового потока, которые прошли широкую апробацию в экспериментальных исследованиях энергоемких технологических процессов.

**Ключевые слова:** методы и средства теплометрии, математические модели, прямые и обратные задачи теплопроводности.

## Введение

Для ряда интенсивно развивающихся отраслей науки и техники решение основных проблем зависит от возможностей теплометрии – получения экспериментальной информации о плотностях тепловых потоков (ТП) в объектах исследования или проектирования. В частности, это теплоэнергетика, тепловые двигатели, металлургия, электронные устройства, теплозащита летательных аппаратов и их термовакуумные испытания, исследование процессов теплообмена в разреженных, сверхзвуковых, двухфазных, псевдоожиженных и других потоках, медицина, биология, приборы для измерения теплофизических свойств материалов и многое другое (рис. 1).

Рис. 1. Направления и объекты прикладной теплометрии

Как видно, объекты прикладной теплометрии отличаются большим разнообразием, и разработка универсальной методологии для оценки тепловых параметров объектов является актуальной задачей.

Для решения ряда проблем в прикладной теплометрии разработаны различного типа приемники тепловых потоков (ПТП), которые, как правило, представляют собой автономные, достаточно миниатюрные устройства с одномерным теплопереносом и, в том числе, одноемкостные. По наличию или отсутствию статической характеристики (градуировки) они могут быть статическими или астатическими средствами прямых или косвенных измерений соответственно.

Измерения плотности переменного теплового потока $q = q(\tau)$ инерционными статическими ПТП, также как и измерения $q = const$ и $q = q(\tau)$ астатическими ПТП, когда они работают в динамическом режиме, относятся к области нестационарной теплометрии. В обоих случаях возникает необходимость расчетного определения (восстановления) плотности входящего в ПТП теплового потока по непосредственно измеряемым температурам или их перепадам в отдельных точках ПТП. Эти задачи относятся к нестационарным граничным обратным задачам теплопроводности (ОЗТ), решения которых связаны с рядом трудностей и частично рассмотрены в работах [1–5].

Все ПТП для нестационарной теплометрии условно можно разделить на градиентные, калориметрические и с элементами полупространства (рис. 2).

Из-за существенных различий в условиях теплометрии большинство ПТП, иногда даже в рамках одной разновидности, существенно отличается как по устройству, так и по методам восстановления плотности теплового потока $q(\tau)$. Практически в литературе отсутствует единый подход к ПТП как средствам измерений, к методологии и возможностям их использования в нестационарной теплометрии, а также к оценкам методических погрешностей измерений. Кроме того, анализ перспектив развития и совершенствования методов прикладной теплометрии показывает, что современный уровень измерительной техники и ее информационных технологий выдвигает перед средствами прикладной нестационарной теплометрии очевидные требования автономного функционирования в реальном времени проведения эксперимента. Важным условием его выполнения является оптимизация алгоритмов восстановления $q(\tau)$ по критериям точности и вычислительной эффективности (быстродействия). Создание единого подхода к прикладной теплометрии требует систематизации, обобщения и анализа обширной информации на основе математических моделей.

**Математические модели сенсоров нестационарного теплового потока**

Математические модели (ММ) являются количественным представлением процессов теплопереноса в ПТП, в которых учитываются особенности конструкции ПТП и их размещение на объекте исследования. ММ ПТП предназначены для решения прямых задач теплопереноса (ПЗТ) в ПТП с целью исследования статических и динамических свойств последних, а именно: реакции ПТП на различные входные воздействия $q(\tau)$, расчетов статических характеристик (градуировок), расчетов стандартных динамических характеристик – переходных, импульсно-переходных, частотных и др., а также использования при решении граничных ОЗТ по восстановлению плотности входящих в ПТП тепловых потоков $q(\tau)$ произвольной формы.

Основными требованиями к ММ ПТП являются:

- высокая степень адекватности ММ реальным процессам, протекающим в ПТП, и точности их описания;
- наличие оптимального по точности и вычислительной экономичности (быстродействию) алгоритма решения, удобного для реализации на ЭВМ.

В соответствии с общепринятой методологией построения (идентификации) ММ адекватных реальным объектам вначале должна выполняться структурная идентификация ММ – выбор ее математический структуры и формы, а затем параметрическая идентификация – установление значений ее параметров (коэффициентов). Применительно к ПТП решение задачи структурной идентификации ММ обеспечивается учетом в тепловых моделях (ТМ) ПТП всех существенных факторов теплопереноса, в том числе:

- особенности конструкции, наличие составляющих элементов из различных материалов, защитных слоев, контактных тепловых сопротивлений, воздушных зазоров и др.;
- зависимость теплофизических характеристик (ТФХ) материалов от температуры и другие возможные нелинейности;
- реальные граничные условия теплообмена на рабочей и тыльной поверхностях ПТП, и т.д.

Анализ результатов модельных и натурных экспериментов [4, 5] показал, что из всего многообразия ММ сформулированным выше требованиям удовлетворяют дифференциально-разностные модели (ДРМ) [4]. Теплоперенос в одномерных ПТП любого типа может быть описан системой обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка относительно составляющих $t_i$ вектора состояния $\mathbf{T}(\tau)$, которая в векторно-матричной форме имеет вид [4, 6]

$$\frac{d}{d\tau}\mathbf{T}(\tau) = \mathbf{T}(\tau) = F \cdot \mathbf{T}(\tau) + G\mathbf{U}(\tau). \qquad (1)$$

Для однородного теплоизолированного стержня с граничными условиями второго рода $q(\tau)$ на торце векторы состояния $\mathbf{T}(\tau)$ и управления $\mathbf{U}(\tau)$, матрицы обратных связей $F$ и управления $G$ имеют вид [6]

$$\mathbf{T} = \begin{vmatrix} t_1 \\ t_2 \\ \cdot \\ t_n \end{vmatrix};\ \mathbf{U} = \begin{vmatrix} q_1(\tau) \\ q_2(\tau) \end{vmatrix};\ G = \begin{vmatrix} \frac{1}{c\rho\Delta} & 0 \\ 0 & 0 \\ \cdot & \cdot \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{c\rho\Delta} \end{vmatrix};\ F = \begin{vmatrix} -2b & 2b & 0 & . & 0 \\ b & -2b & b & . & 0 \\ . & . & . & . & . \\ 0 & . & b & -2b & b \\ 0 & . & 0 & 2b & -2b \end{vmatrix}.$$

Общее решение уравнения (1) может быть записано в виде:

$$\mathbf{T}(\tau) = \Phi(\tau, \tau_0)\mathbf{T}(\tau_0) + \int_{\tau_0}^{\tau} \Phi(\tau, \Theta) G\mathbf{U}(\Theta) d\Theta,$$

где $\Phi(\tau, \tau_0)$ – переходная $(n \times n)$ – матрица (матрица Коши, матрициант).

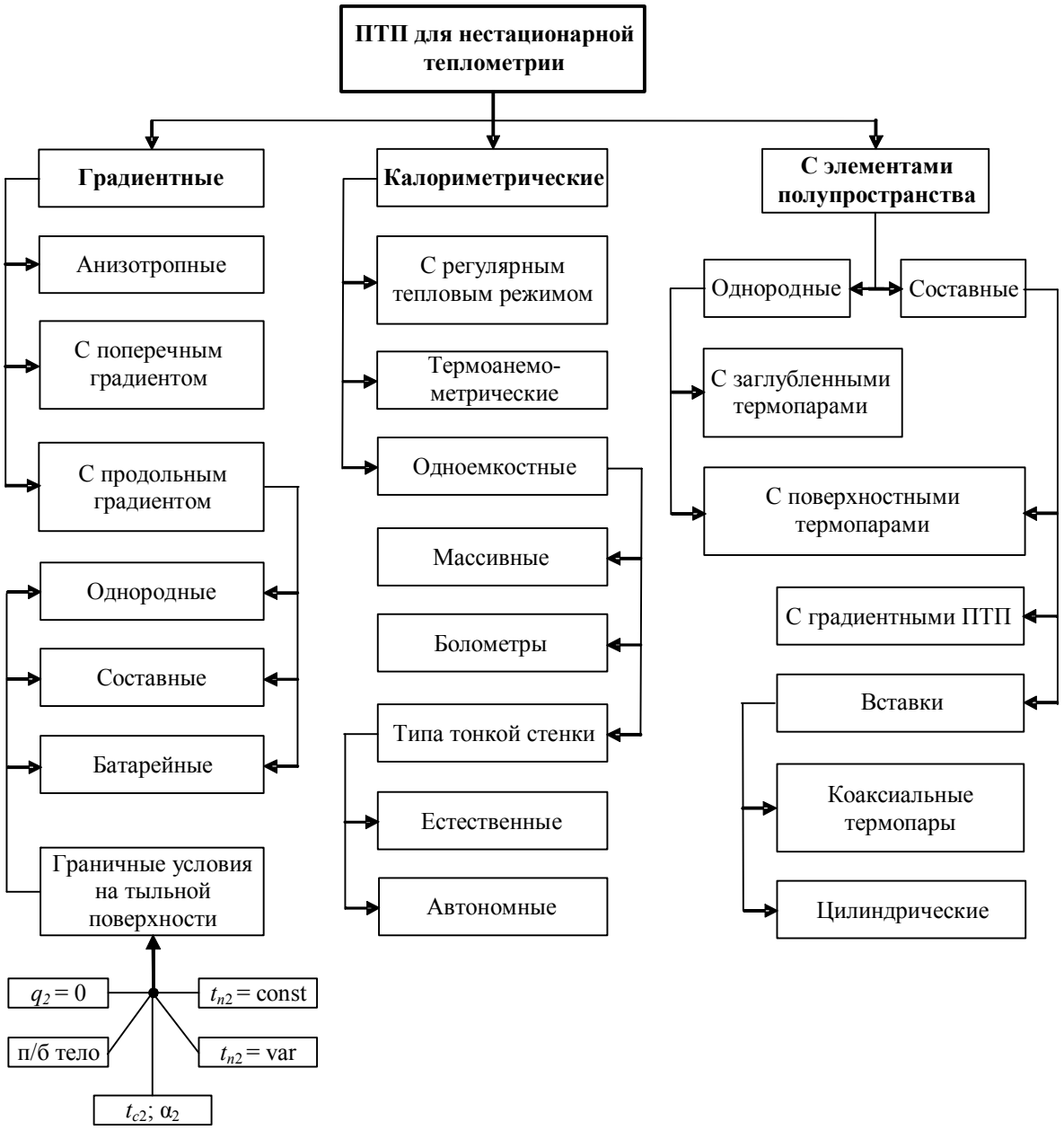



Рис. 2. ПТП для нестационарной теплометрии

Переходная матрица $\Phi(\tau, \tau_0)$ отражает внутренние тепловые связи в ПТП, так как ее элементы представляют собой переходные за период $\Delta\tau = \tau - \tau_0$ процессы каждой составляющей вектора состояния от единичных возмущений по остальным его составляющим, протекающие в свободной системе ($\mathbf{U} = 0$).

При численных решениях уравнения (1), в соответствии с требованиями к его точности, устанавливается малый временной шаг $\Delta\tau$. Тогда матрица $\Phi(\tau, \tau_0)$ определяется следующим бесконечным рядом:

$$\Phi(\tau,\tau_0) = I + F\cdot\Delta\tau + \frac{1}{2!}\cdot F^2\cdot(\Delta\tau)^2 + \frac{1}{3!}\cdot F^3\cdot(\Delta\tau)^3 + \ldots + \frac{1}{p!}\cdot F^p\cdot(\Delta\tau)^p,$$

где $I$ – единичная матрица размерности $(n\times n)$, а решение имеет вид [1]

$$\mathbf{T}_{k+1} = \Phi\cdot\mathbf{T}_k + \frac{1}{2}\cdot(I+\Phi)\cdot G\cdot\mathbf{U}_k\cdot\Delta\tau, \qquad (2)$$

где $\mathbf{T}_k = \mathbf{T}(\tau_k)$, $\mathbf{U}_k = \mathbf{U}(\tau_k)$, а $\tau_k = k\cdot\Delta\tau$, $k = 0, 1, 2\ldots$.

При рассмотрении линейного теплопереноса переходная матрица $\Phi$ постоянна и вычисляется единожды. Однако, решение уравнения (2) может быть использовано и при зависимости теплопроводности $\lambda$ и теплоемкости $c$ от температуры. В этом случае выполняется пошаговая, на один шаг вперед, линеари-

зация матрицы $F$: для $(k+1)$-го шага значения $\lambda$ и $c$ относятся к температурам $\mathbf{T}_k$, полученным на предыдущем шаге. Переходная матрица должна вычисляться для каждого $(k+1)$-го временного шага.

ДРМ в виде (1) описывает процесс нестационарного теплопереноса в ПТП. При этом измерению подлежат либо температуры в отдельных точках, либо градиенты этих температур, либо среднеобъемные температуры чувствительных элементов. Эта информация, а также сведения о характере и величинах погрешностей в измерениях отражаются в следующей математической модели измерений ПТП:

$$\mathbf{Y}_k = H\mathbf{T}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k,$$

где $\mathbf{Y}_k$ и $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ – векторы измерений и погрешностей в измерениях; $H$ – матрица измерений.

## Заключение

Проведен анализ направлений и объектов прикладной теплометрии, приведены основные типы приемников тепловых потоков, разработаны адекватные математические модели процессов теплопереноса в приемниках, а также созданы программы для определения с единых позиций динамических характеристик различных типов приемников для восстановления нестационарного теплового потока.

Автором разработаны и прошли многократную апробацию ДРМ различных типов ПТП, приведенных на рис. 2, составлены оригинальные программы определения с единых позиций динамических характеристик ПТП и восстановления нестационарных тепловых потоков.

## Литература

1. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии. Ч. 1 // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т. 46. – № 8. – С. 50–54.
2. Пилипенко Н.В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплометрии. Ч. 2 // Изв. вузов. Приборостроение. – 2003. – Т. 46. – № 10. – С. 67–71.
3. Пилипенко Н.В. Методические погрешности определения нестационарных условий теплообмена при параметрической идентификации // Измерительная техника. – 2007. – № 8. – С. 54–59.
4. Пилипенко Н.В., Гладских Д.А. Решение прямых и обратных задач теплопроводности на основе дифференциально-разностных моделей теплопереноса // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 3. – С. 69–74.
5. Пилипенко Н.В., Кириллов К.В. Определение нестационарных условий теплообмена в энергетических установках // Приборы. – 2008. – № 9. – С. 21–25.
6. Pilipenko N. Parametrical identification of differential-difference heat transfer models in non-stationary thermal measurements // Heat Transfer Research. – 2008. – V. 39. – № 4. – P. 311–315.

***Пилипенко Николай Васильевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, pilipenko38@mail.ru

# 4 МЕХАНИКА И МЕХАТРОНИКА

УДК 621.822.172

## ДИНАМИКА ШПИНДЕЛЬНЫХ ГИДРОСТАТИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ДИАФРАГМЕННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ

**В.А. Прокопенко, И.А. Чернов**

Приведены результаты исследования динамического качества гидростатических подшипников шпиндельных узлов современных металлорежущих станков. Дана математическая модель гидростатического подшипника. Рассмотрены возможности использования регуляторов с целью улучшения виброустойчивости. Предложена методика выбора параметров корректирующих RC-цепей. Рассчитаны переходные процессы при различных режимах работы, построены соответствующие частотные характеристики.

**Ключевые слова:** гидростатический подшипник, шпиндельный узел, виброустойчивость, динамические характеристики, мембранный регулятор, RC-коррекция.

### Актуальность проблемы. Постановка задачи

Повышение динамического качества технических систем и оборудования является основной задачей при их создании и эксплуатации. Применительно к металлорежущим станкам (МРС) одна из основных проблем – это обусловленная требованиями роста производительности и качества обработки потребность увеличения виброустойчивости, которая практически не может быть удовлетворена при использовании в шпиндельных узлах (ШУ) традиционных подшипников качения [1]. Эффективным решением может служить переход к внедрению опор жидкостного трения – гидростатических подшипников (ГСП). Такой положительный опыт получен при создании отечественного серийного гибкого производственного модуля ЛР400ПМФ-4. Выполненные исследования [1] показывают, что, при обеспечении роста динамического качества ГСП и МРС в целом, в случае использованной в станке дроссельной схемы управления, система автоматического регулирования (САР) является все-таки колебательной, и устранить этот недостаток практически невозможно ни параметрически, ни смещением оси шпинделя, ни введением корректирующих RC-цепей.

Существенный интерес представляют результаты исследования возможностей введения в схемы управления ГСП с традиционно применяемыми дросселями мембранных (диафрагменных) регуляторов, обладающих наилучшими эксплуатационно-техническими характеристиками по сравнению с другими типами регуляторов. При этом возможны следующие варианты схемы управления опор ГСП в ШУ:

1. в передней опоре (ПО) ШУ используются мембранный регулятор и дроссель типа «сопло–заслонка», в задней опоре (ЗО) – два дросселя (рис. 1, а);
2. в ПО и ЗО ШУ используется мембранный регулятор и дроссель типа «сопло–заслонка» (рис. 1, б).

При анализе статической жесткости вариантов сопоставлены радиальные смещения шпинделя на кромке переднего ГСП и на максимальном вылете, включающие деформации упругой линии самого шпинделя и статическую ошибку в ГСП. При этом рассмотрены раздельно нагрузочные и разгрузочные ветви соответствующих статических характеристик.

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы. По исходному варианту дроссельного ГСП для обеих ветвей статической характеристики смещение на кромке ГСП при любых режимах обработки практически одинаково и составляет на максимальной нагрузке около 50% начального зазора. Введение регулятора по варианту 1 позволяет несколько увеличить нагрузочную способность ГСП во всем диапазоне нагрузок. Подобная дополнительная замена дросселя на регулятор в ЗО (вариант 2) существенно на общей жесткости ШУ не сказывается, значительно усложняя при этом как конструкцию ШУ, так и настройку его ГСП.

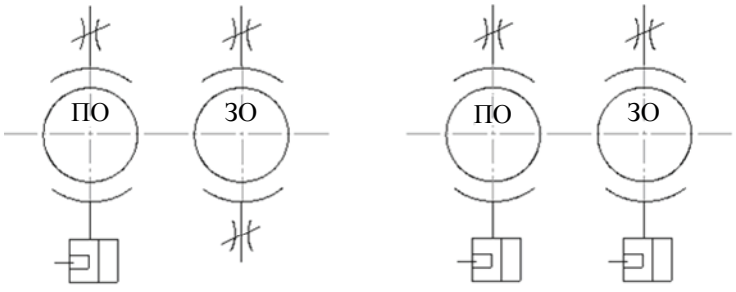



Рис. 1. Управление опорами ГСП по схеме «регулятор–дроссель» (а) и «регулятор–регулятор» (б)

Таким образом, по статическим свойствам все варианты практически эквивалентны, что обусловлено доминирующим влиянием существенно более низкой жесткости консольного шпинделя. Далее сравниваются исходный вариант и более простой из регуляторных вариант 1.

Динамические характеристики ГСП влияют на общую виброустойчивость МРС в целом, т.е. производительность и качество обработки. Следовательно, анализ поведения САР рассматриваемых ГСП с различными системами управления в динамике является важным этапом процесса проектирования, а также оценки его результатов.

**Краткое описание математической модели**

Система дифференциальных уравнений, представляющая собой математическое описание нелинейной модели ГСП, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} M\ddot{h}_1 = P_Z + \dfrac{p_1}{2}\left(l_1B_1 + b_1L_1\right) - \dfrac{p_0}{2}\left(l_0B_0 + b_0L_0\right) - \dfrac{\mu\dot{h}_1}{4h_1^3}\left[\left(B_1 - b_1\right)^3 l_1 + \left(L_1 - l_1\right)^3 b_1\right] - \\ - \dfrac{\mu\dot{h}_1}{4h_0^3}\left[\left(B_0 - b_0\right)^3 l_0 + \left(L_0 - l_0\right)^3 b_0\right]; \\ \dfrac{p_\text{п} - p_1}{R_{\text{др}1}} = \dfrac{p_1h_1^3}{3\mu}\left(\dfrac{l_1}{B_1 - b_1} + \dfrac{b_1}{L_1 - l_1}\right) + \dfrac{V_{\text{пр}1}}{E_\text{м}}\dot{p}_1 + \dot{h}_1\left(B_1l_1 + b_1L_1 - 2l_1b_1\right); \\ \dfrac{p_\text{п} - p_0}{k_\text{р}\mu}H_\text{р}^3 = \dfrac{p_0h_0^3}{3\mu}\left(\dfrac{l_0}{B_0 - b_0} + \dfrac{b_0}{L_0 - l_0}\right) + \dfrac{V_{\text{пр}0}}{E_\text{м}}\dot{p}_0 + \dot{h}_0\left(B_0l_0 + b_0L_0 - 2l_0b_0\right) + Q_\text{д}, \end{cases} \quad (1)$$

где использованы следующие обозначения: $M$ – приведенная масса ШУ; $P_Z$ – внешняя нагрузка; $p_\text{п}$ – давление питания; $h_1$ и $h_0$ – зазоры в основной и замыкающей опорах ГСП ($h_\Sigma = h_0 + h_1$ – суммарный зазор в ГСП); $p_1$ и $p_0$ – давление жидкости в основной и замыкающей опорах; $B$ и $L$ – ширина и длина опоры ГСП; $b$ и $l$ – ширина и длина кармана опоры; $\mu$ – динамическая вязкость жидкости; $R_\text{др}$ – гидравлическое сопротивление дросселей; $V_\text{пр}$ – приведенные объемы карманов; $E_M$ – модуль объемной сжимаемости жидкости; $Q_\text{д}$ – величина расхода, обусловленного прогибом диафрагмы; $H_\text{р} = H_0 + \Delta H = H_0 + ep_0$ – величина зазора в регуляторе ($H_0$ – начальный зазор в регуляторе; $e$ – податливость мембраны регулятора). Первое уравнение системы является уравнением динамического равновесия шпинделя на ГСП. Остальные два – это уравнения баланса расходов жидкости (масла) через опоры ГСП с учетом вязкости и сжимаемости [2].

Расчет регулятора производится по методике [3]. В результате определены следующие его параметры: диаметр мембраны, толщина мембраны, ее податливость и начальный зазор.

Линеаризация системы (1) проводится разложением в ряд Тейлора в окрестности начальной точки пространства. После преобразования по Лапласу линеаризованной системы, переходя к операторной форме записи и вводя обозначения коэффициентов и постоянных времени, система в отклонениях представляется в виде

$$\begin{cases} k_1\left(T_1S + 1\right)S\Delta h_1 = \Delta P_Z + k_{21}\Delta p_1 - k_{20}\Delta p_0, \\ -k_{41}\left(T_{31}S + 1\right)\Delta h_1 = k_{31}\left(T_{21}S + 1\right)\Delta p_1, \\ k_{40}\left(T_{30}S + 1\right)\Delta h_1 - k_{50}\left(T_{40}S - 1\right)\Delta p_0 = k_{30}\left(T_{20}S + 1\right)\Delta p_0, \end{cases}$$

где $k_i$ и $T_{ij}$ – коэффициенты и постоянные времени САР ГСП.

**Анализ динамических свойств системы**

Анализ динамического качества ГСП выполнен с использованием прикладных пакетов МВТУ и Matlab на базе известных методов теории автоматического управления по логарифмическим амплитудно-частотным (ЛАЧХ) и фазо-частотным (ЛФЧХ) характеристикам для САР с последующей проверкой расчетом переходных процессов при ступенчатом нагружении как малыми, так и большими нагрузками с учетом нелинейности исходной математической модели.

Последующие расчеты выполнены применительно к условиям модуля ЛР400ПМФ4, имеющего ШУ на ГСП со следующими параметрами: радиальная составляющая силы резания – 0–10 кН; давление питания – 8,5 МПа; максимальная частота вращения шпинделя – 4000 об/мин; мощность привода главного движения – 30 кВт; диаметр шпинделя – 125 мм.

Основным критерием при оценке динамического качества по ЛАЧХ и ЛФЧХ является запас по фазе $\Delta\varphi$ на частоте среза $\omega_\text{ср}$ [4].

На рис. 2 кривая 1 – ЛАЧХ исходного для станка ЛР400ПМФ4 дроссельного варианта ГСП, а кривая 1′ – соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом составляет $\Delta\varphi_1 = 7{,}2°$ на частоте среза $\omega_{ср1} = 4058\,с^{-1}$, что значительно ниже минимально допустимого значения $\Delta\varphi = 40°$ [4].

Кривая 2 – ЛАЧХ варианта ГСП с регулятором (вариант 1), а кривая 2′ – соответствующая ей ЛФЧХ. Фактический запас по фазе при этом увеличивается до $\Delta\varphi_2 = 10{,}1°$ на частоте среза $\omega_{ср2} = 3565\,с^{-1}$ (т.е. на 40% больше исходного варианта), что также ниже упомянутого минимально допустимого запаса.

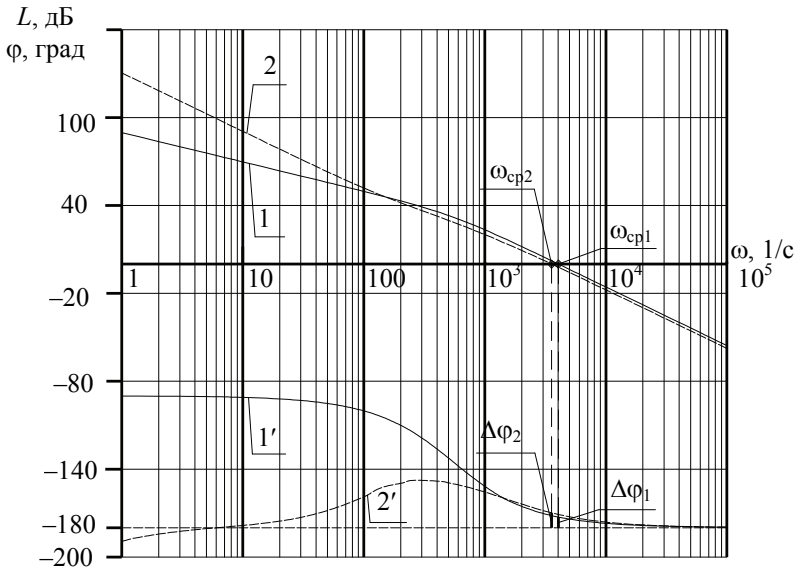



Рис. 2. ЛАЧХ и ЛФЧХ для ГСП с дроссельным (кривые 1–1′) и регуляторным (кривые 2–2′) управлением

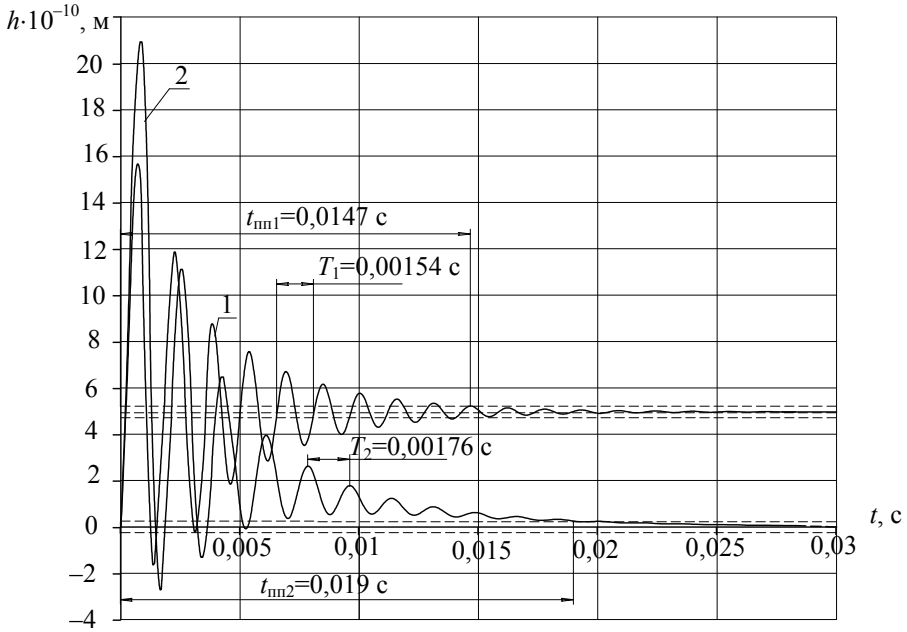



Рис. 3. Переходные процессы для исходного варианта (кривая 1) и варианта с использованием регулятора (кривая 2)

Таким образом, установлено, что использование регуляторов несколько повышает виброустойчивость ШУ, снижая частоту колебаний и статическую ошибку (рис. 3), однако дальнейшее улучшение динамических свойств ГСП является необходимым. Одним из весьма эффективных способов коррекции динамического качества ГСП может служить включение в гидравлическую схему ГСП корректирующих RC-цепей аналогично тому, как это рассмотрено для дроссельной варианта схемы управления [1]. Система уравнений в отклонениях, описывающая скорректированный RC-цепью вариант регуляторного ГСП, имеет следующий вид:

$$\begin{cases} k_1\left(T_1S+1\right)S\Delta h_1 = \Delta P_Z + k_{21}\Delta p_1 - k_{20}\Delta p_0; \\ -k_{41}\left(T_{31}S+1\right)\Delta h_1 = \left(k_{31}\left(T_{21}S+1\right)+\dfrac{1}{R_A}\cdot\dfrac{T_AS}{T_AS+1}\right)\Delta p_1 - \dfrac{1}{R_A}\cdot\dfrac{T_AS}{T_AS+1}\Delta p_0; \\ k_{40}\left(T_{30}S+1\right)\Delta h_1 - k_{50}\left(T_{40}S-1\right)\Delta p_0 = \left(k_{30}\left(T_{20}S+1\right)+\dfrac{1}{R_A}\cdot\dfrac{T_AS}{T_AS+1}\right)\Delta p_0 - \\ -\dfrac{1}{R_A}\cdot\dfrac{T_AS}{T_AS+1}\Delta p_1, \end{cases} \quad (2)$$

где $T_A$ – постоянная времени, обусловленная подключением корректирующей RC-цепи.

Выбор параметров коррекции может производиться с использованием системы уравнения (2) по трехмерной поверхности зависимости запаса по фазе Δφ либо логарифмического декремента колебаний λ от $C_A$ и $R_A$. Анализ такой трехмерной поверхности для варианта 1 показывает, что декремент растет как с увеличением емкости $C_A$, так и с увеличением сопротивления $R_A$ (рис. 4), но в отличие от дроссельного ГСП для рассматриваемых диапазонов параметров коррекции $C_A$ и $R_A$ не имеет максимума в зависимости от величины сопротивления $R_A$ при каждом значении $C_A$.

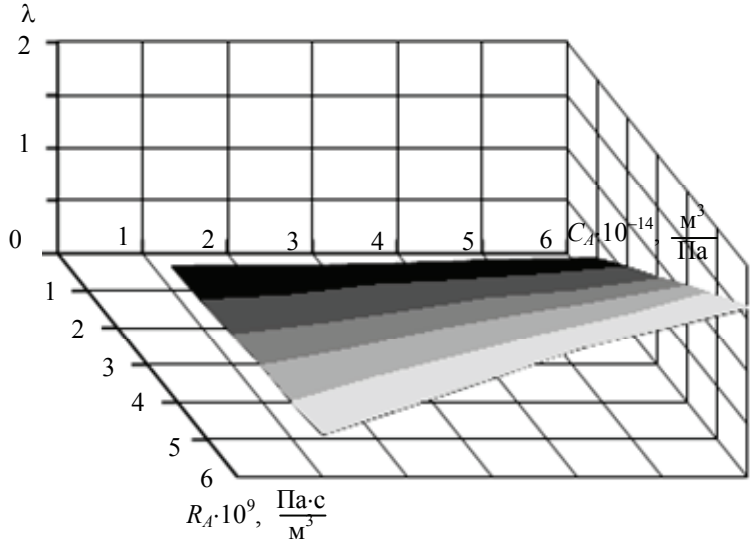



Рис. 4. Зависимость λ = *f*($C_A$,$R_A$) для ГСП с регуляторным управлением при подключенной RC-цепи

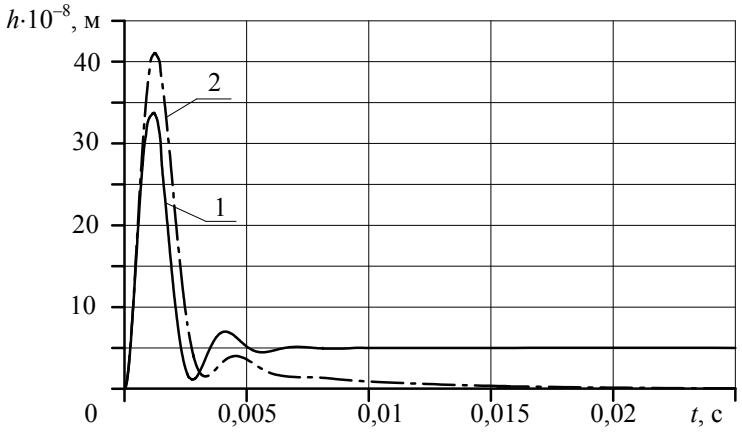



Рис. 5. Переходные процессы в ГСП при подключенной RC-цепи:
1 – исходный вариант ГСП; 2 – вариант ГСП с использованием регулятора

При выборе значения емкости $C_A = 5\cdot10^{-14}$ м³/Па (с учетом ограничения по давлению) оказывается, что коррекция с параметрами $C_A = 5\cdot10^{-14}$ м³/Па и $R_A = 12\cdot10^9$ Па·с/м³, являющаяся наилучшей для дроссельного варианта ГСП, не является таковой для регуляторного варианта ГСП, хотя при этом снижает колебательность ГСП относительно варианта без коррекции в 4,6 раза и увеличивает демпфирование по сравнению с корректированным исходным вариантом (рис. 5).

При увеличении сопротивления $R_A$ для варианта 1 установлен наилучший вариант коррекции RC-цепью для регуляторного ГСП – при значениях параметров $C_A = 5 \cdot 10^{-14}$ м$^3$/Па и $R_A$ =20·10$^9$ Па·с/м$^3$, что подтверждается переходными процессами при малых (рис. 6, а) и больших (рис. 6, б) нагрузках.

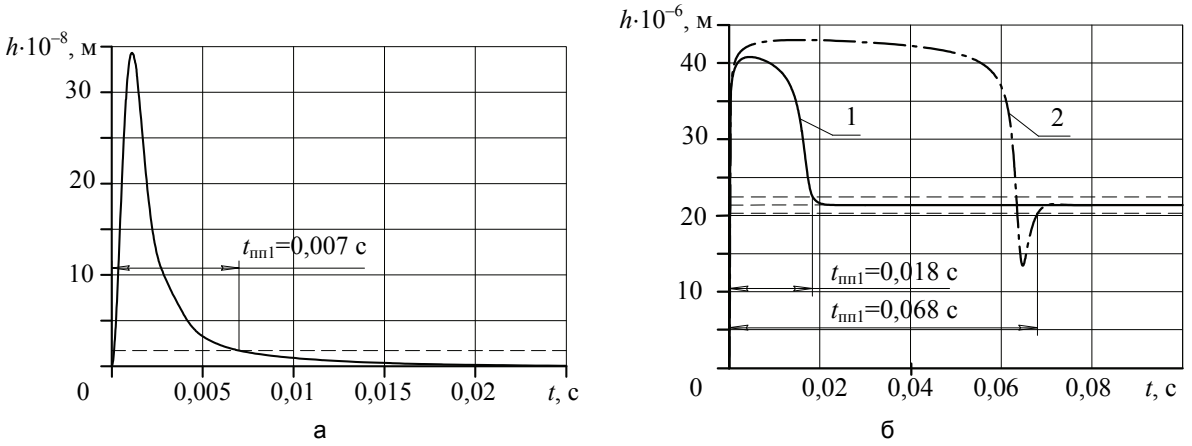



Рис. 6. Переходный процесс для регуляторной САР ГСП с RC-цепью для $C_A$ = 5·10$^{-14}$ м$^3$/Па и $R_A$ = 20·10$^9$ Па·с/м$^3$, при малых нагрузках (а); при нагрузке 50 кН (1 – вариант без коррекции; 2 – вариант с параметрами коррекции $C_A$ = 5·10$^{-14}$ м$^3$/Па и $R_A$ = 20·10$^9$ Па·с/м$^3$) (б)

Анализ этих зависимостей показывает, что коррекция ГСП с регулятором позволяет свести к нулю колебательный характер движения системы, тогда как достичь этого для скорректированного ГСП по исходному дроссельному варианту не представляется возможным. Таким образом, коррекция регуляторного ГСП эффективнее дроссельного и обеспечивает увеличение демпфирования с получением САР высокого динамического качества.

Из анализа переходных процессов при больших нагрузках можно сделать вывод, что рассматриваемый вариант коррекции существенно не ухудшает динамическое качество системы. При использовании коррекции время переходного процесса относительно варианта 2 без корректора ($t_{\text{пп1}} = 0,018$ с) хотя и несколько увеличивается, но колебательность фактически отсутствует.

**Заключение. Рекомендации**

Данные исследования показали, что использование регуляторов в схеме управления ГСП, а также подключение корректирующей RC-цепи дает значительное повышение виброустойчивости ШУ на ГСП (вплоть до полного устранения колебаний в системе). Реализация определенной при исследованиях гидравлической емкости $C_A$ наилучшим образом может быть осуществлена с помощью стандартного металлического сильфона [5], характеризуемого следующими параметрами: длина – 16 мм; диаметр – 11 мм; количество гофров – 10; толщина стенки – 0,16 мм; наибольшее давление – 14,5 МПа. Гидравлическое сопротивление $R_A$ корректора выполняется аналогично конструкции дросселей в исходном варианте на базе сопротивления «сопло–заслонка», при котором режим течения жидкости – ламинарный, а величина расчетного зазора составляет около 0,2 мм. Расчет параметров ГСП и исследование их динамических свойств при различных способах коррекции, построение переходных процессов и частотных характеристик можно выполнять с использованием программных систем Mathcad или Matlab, а также ряда программных комплексов для динамического моделирования (SIAM, МВТУ).

**Литература**

1. Бундур М.С., Прокопенко В.А., Чернов И.А. Моделирование шпиндельных гидростатических подшипников и исследование возможностей повышения их динамического качества // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 6 (64). – С. 32–38.
2. Проектирование гидростатических направляющих металлорежущих станков и станочных комплексов: Метод. указания / Под ред. М.А. Болотникова, В.Г. Лебедева, П.П. Петкова и др. – СПб: СПбГТУ, 1993. – 28 с.
3. Гидростатические направляющие с регуляторами. Расчет и проектирование. Рекомендации / Е.М. Якир, Г.А. Левит, Б.Г. Лурье. – М.: ЭНИМС, 1970. – 64 с.
4. Иващенко Н.Н. Автоматическое регулирование. – М.: Машиностроение, 1978. – 736 с.
5. ГОСТ 21482-76. Сильфоны однослойные измерительные металлические. Технические условия. – Введ. 01.01.77. – М.: Госстандарт, 1977. – 122 с.

*Прокопенко Вячеслав Алексеевич* – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет кандидат технических наук, доцент, prokopenko@gak.spb.su
*Чернов Иван Александрович* – Санкт-Петербургский государственный политехнический университет кандидат технических наук, доцент, chernov@gak.spb.su

**УДК 531**

# УПРАВЛЕНИЕ ВРАЩАТЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА ПРИ ПЕРЕМЕННОМ РАСПРЕДЕЛЕНИИ МАССЫ

**В.С. Королев, Р.Ю. Кравчук**

Рассматривается задача управления вращательным движением относительно центра масс механической системы, состоящей из основного тела и других тел или частиц, которые могут двигаться относительно главного тела или менять массу, определяя переменное распределение массы и дополнительное изменение кинетического момента. Получены уравнения динамики, которые можно исследовать аналитическими или численными методами.
**Ключевые слова**: управление, вращательное движение, космический аппарат, гироскопы, переменное распределение массы, гравитационное поле.

## Введение

Теория оптимального управления движением космических аппаратов в гравитационном поле зародилась более 100 лет назад, после работ К.Э. Циолковского и В. Гомана, задолго до начала космической эры. Она продолжена в работах В.В. Белецкого, В.И. Зубова, Н.Н. Красовского, Д.Ф. Лоудена, В.С. Новоселова, В.Е. Охоцимского [1–8]. За это время теория бурно развивалась параллельно со стремительным развитием ракетной техники и практической космонавтики. Было опубликовано большое количество научных работ, в которых изучены различные аспекты и рассмотрены многочисленные частные случаи, а также работы обобщающего характера, в которых сформулированы общие принципы оптимального управления движением космических аппаратов в задачах перехода между заданными орбитами и вращательного движения относительно центра масс. Основными являются задачи построения движений, достигающих заранее поставленных целей при минимальных затратах топлива при работе двигателей (такие траектории называются энергетически оптимальными) или на минимальных промежутках времени (задачи быстродействия).

## Постановка задачи

Рассматриваются задачи управления движением в центральном гравитационном поле для механической системы, которая состоит из основного тела (носитель, космический аппарат или космическая станция, которые можно считать абсолютно твердыми), а также других тел или частиц (в том числе антенны, солнечные батареи, гироскопы, потоки жидкого топлива при работе реактивных двигателей, подвижные или перемещаемые детали). Они могут двигаться относительно главного тела и определяют переменное распределение массы всей системы или изменения кинетического момента и влияют на движение носителя, а также создают управляющие моменты для разворота или демпфирования колебаний и стабилизации при заданной ориентации. Для гироскопических комплексов определяющим является способность создавать управляющие моменты за счет затрат электроэнергии без дополнительного расхода топлива. Другим достоинством является способность реализовать высокоточное управление. Для космической астрофизической лаборатории «Гамма» использовались шесть гироскопов, которые обеспечивали ориентацию при угловых скоростях поворота до 1°/с и точности стабилизации до 10 угловых секунд.

В общем случае уравнения движения космического аппарата в гравитационном поле естественным образом разделяются на уравнения движения центра масс и вращательного движения относительно центра масс системы. Управление может быть реализовано включением реактивных двигателей космического аппарата или специальных устройств, которые размещены на носителе и могут обеспечить действие большой тяги на коротких промежутках времени (отдельный импульс или последовательность) или малой тяги, но имеющей почти неограниченный ресурс по времени работы.

Изменения декартовых координат для каждого выделенного объекта в пространственном случае описывает система трех уравнений второго порядка:

$$\frac{d^2 x_i}{dt^2} + \frac{\mu}{r^3} x_i = \frac{\partial}{\partial x_i}(U) + P_i = f_i, \quad i = 1,2,3.$$

Здесь $x$ – декартовы координаты; $r$ – модуль радиус-вектора центра масс; $U$ – силовая функция учитываемых возмущений; $\mu$ – гравитационный параметр центрального тела; $P$ – непотенциальные силы, включая реактивную тягу двигателей на активных участках полета.

При отсутствии возмущений, когда их считают не существенными, движение тела в центральном гравитационном поле определяется начальными значениями радиус-вектора, вектора скорости и грави-

тационным параметром. Они определяют постоянные для выделенного промежутка пассивного полета параметры эллиптической орбиты, которые называют кеплеровыми элементами

$k(t) = (a, e, i, \Omega, \omega, M_0)$.

Они могут определяться по результатам наблюдений и прогнозироваться на следующий промежуток времени. Это позволяет вычислять абсолютные декартовы координаты $x(t)$ и скорости $v(t)$ для невозмущенного движения в заданный произвольный момент $t$ по следующим формулам:

$$r = a(1 - e\cos E), \quad p = a(1 - e^2);$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\mu}{p}}\, e r^{-1} \sin\vartheta, \quad \beta = \sqrt{\mu p}\, r^{-1};$$

$$E - e\sin E = M_0 + n(t - t_0) = M;$$

$$x_1 = r(\cos u\ \cos\Omega - \sin u \sin\Omega\cos i);$$

$$x_2 = r(\cos u \sin\Omega - \sin u\cos\Omega\cos i);$$

$$x_3 = r\sin u \sin i;$$

$$v_1 = \alpha x_1 + \beta(-\sin u\cos\Omega - \cos u\sin\Omega\cos i);$$

$$v_2 = \alpha x_2 + \beta(-\sin u\sin\Omega + \cos u\cos\Omega\cos i);$$

$$v_3 = \alpha x_3 + \beta\cos u\sin i.$$

В упрощенной импульсной постановке элементы считают постоянными, а работа реактивных двигателей на активных участках определяет мгновенное изменение вектора скорости и новые значения кеплеровых элементов.

Время движения между двумя точками орбиты можно определить из уравнения Кеплера. В случае необходимости учета возмущающих или реактивных сил можно использовать аппроксимацию возмущений кусочно-постоянными функциями, что приводит задачу к последовательному сопряжению участков траекторий, полученных при выбранной параметризации промежутков движения и действующих импульсов. Для нахождения изменений элементов $k(t)$ возмущенного движения можно использовать дифференциальные уравнения Эйлера, где правые части уравнений определяются текущими значениями элементов и проекциями возмущающих ускорений на оси орбитальной системы координат [9–13].

Уравнения вращательного движения механической системы или тела с подвижными частицами можно получить из основной теоремы об изменении кинетического момента в виде динамических уравнений Эйлера с использованием подвижной декартовой системы координат, которая вращается вместе с основным телом, а начало отсчета 0 совпадает с центром масс.

В общем случае задача определения движения сложной механической системы приводит к необходимости учитывать перемещение центра масс всей системы относительно системы координат носителя и изменение параметров тензора инерции в выбранной системе координат, которые необходимо уточнять для дальнейшего управления по результатам наблюдений или дополнительных вычислений. При этом рассматриваются различные модели относительного перемещения частиц или вспомогательных тел внутри механической системы [6, 10, 14].

### Управление вращательным движением

В большинстве работ рассматривают задачи оптимального управления, в которых в процессе движения требуется достичь заданного состояния или оказаться в некоторой окрестности нужного положения для дальнейшего управления движением. Критерии оптимальности могут быть разными: обеспечить минимальный расход топлива; реализовать переход за наименьшее или заданное время; получить нужные значения абсолютных или относительных параметров движения. При этом могут существовать дополнительные ограничения на время движения, на количество включений двигателей (число импульсов), на время работы двигателя при отдельных включениях, на общий расход топлива.

Пусть основное твердое тело (носитель) содержит полость, заполненную подвижными частицами, перемещение которых не изменяет направление главных осей инерции. Скорость частицы относительно неподвижной системы $v_a = v_e + v_r$, где $v_e$ – переносная скорость или скорость той точки жесткой координатной системы носителя, с которой в данный момент времени совпадает частица; $v_r$ – относительная скорость частицы по отношению к этой системе. Кинетический момент системы относительно точки 0, являясь линейной функцией абсолютных скоростей, равен $G = G_e + G_r$, где $G_e$ – момент количества движения корпуса носителя, сложенный с кинетическим моментом переносного движения частиц; $G_r$ – момент количества относительного движения.

Обозначая через ω мгновенную угловую скорость носителя, запишем

$$\frac{d'(G_e + G_r)}{dt} + \omega \times (G_e + G_r) = M = M_a + M_r.$$

Здесь $M$ – момент относительно точки 0 внешних $M_a$ и реактивных $M_r$ сил, приложенных к рассматриваемой механической системе

$$M_r = \sum_j r_j \times (F_{ji} + F_{jc} + F_{je}) \ ,$$

где $F_{ji}$ – импульсные силы, действующие на частицу с номером $j$ и определяемые интенсивностью перетекания и относительной скоростью; $F_{jc}$ – силы Кориолиса, действующие на частицу с номером $j$; $F_{je}$ – силы инерции переносного движения; вектор $r_j$ определяет положение частицы.

Кинетический момент мгновенно затвердевшей системы

$$G_e = I \cdot \omega.$$

Если система координат в течение исследуемого промежутка времени совпадает с главными осями эллипсоида инерции, то матрица составляющих тензора инерции $I$ будет диагональной, но главные моменты инерции оказываются переменными величинами. В общем случае присутствуют все элементы матрицы тензора инерции и также нужно учитывать их изменение со временем. В проекции на ось $x$ получим

$$I_x \dot{\omega}_x + (I_z - I_y)\, \omega_y \, \omega_z = M_{ax} + M_{rx} \, .$$

Здесь главная часть гравитационных моментов центрального поля

$$M_{ax} = 3n_0^2 (I_z - I_y)\, \alpha_2 \, \alpha_3 \ ,$$

а суммарный реактивный момент относительно оси

$$M_{rx} = -\dot{I}_x \, \omega_x - \dot{G}_{rx} + \omega_z G_{ry} - \omega_y G_{rz}.$$

Проекции на две другие оси получим циклической перестановкой индексов:

$x \to y \to z \to x$ , $1 \to 2 \to 3 \to 1$.

Оптимальное по быстродействию управление в самом упрощенном случае, соответствующем условиям Лагранжа ($I_x = I_z = I$), для задачи приведения к стационарному вращению КА относительно оси $y$, ортогональной плоскости орбиты, когда дополнительно пренебрегают гравитационными моментами по сравнению с управляющими моментами, можно получить в качестве начального приближения, анализируя систему уравнений

$$\dot{\omega}_x = k \, \omega_z + u_1,$$

$$\dot{\omega}_z = -k \, \omega_x + u_2,$$

$$\dot{\omega}_y = u_3 \ .$$

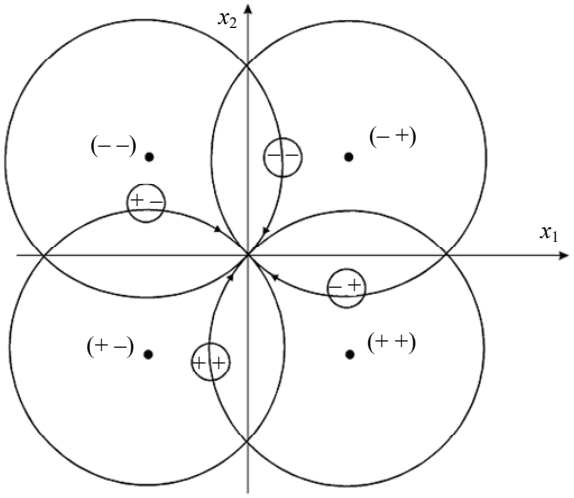



Рисунок. Фазовый портрет для системы

Предполагаем дополнительно, что $|u_1| \le u_0$, $|u_2| \le u_0$, $u_3 = 0$.

Функция Гамильтона для задачи управления будет иметь вид

$$H = -1 + \lambda_1 (k \, \omega_z + u_1) + \lambda_2 (-k \, \omega_x + u_2) \, .$$

Уравнения Эйлера–Лагранжа сопряженной системы уравнений имеют решение

$$\lambda_1 = A \sin(k\, t + \alpha), \quad \lambda_2 = A \cos(k\, t + \alpha) \, .$$

Моменты переключения определяются на основе принципа максимума Понтрягина сменой знака множителей $\lambda$. Получаем управление релейного типа в виде периодической кусочно-постоянной функции $u_i = u_0$ или $u_i = -u_0$.

Фазовые траектории являются последовательно сопряженными дугами окружностей с убывающим радиусом, которые отвечают одной четверти периода.

В начало координат можно попасть по дуге одной из четырех изображенных на рисунке окружностей при смещенном расположении центра, которое определяется последовательностью знаков при реализации управлений $u_1$ и $u_2$ в следующем порядке: (+,+), (+,–), (–,–), (–,+).

Начальный и конечный участок фазовых траекторий могут отличаться от четверти окружности.

### Управление движением гиростата

Гиростатом называют твердое тело, имеющее вращающиеся роторы или гироскопы, т.е. динамически симметричные тела, оси вращения которых закреплены в теле носителя. Пусть число роторов $l$, а центр тяжести каждого ротора располагается на неподвижной в теле его оси вращения. Само тело, называемое носителем, может вращаться вокруг неподвижной точки, совпадающей с неизменным положением в теле общим центром масс. Под ориентацией космического аппарата будем понимать ориентацию системы координат, которая жестко связана с основным телом. При изменении угловых скоростей вращения гироскопов возникает момент, который можно считать управляющим. Запишем кинетический момент системы тел в виде

$$G = G_e + G_r, \quad G_r = \sum G_i \dot{\varphi}_i e, \quad G_e = I\,\omega.$$

Здесь $G_e$ – кинетический момент носителя с невращающимися роторами, $I$ – тензор инерции тела вместе с роторами, $G_i$ – осевой момент инерции $i$-го ротора, $\dot{\varphi}_i$ – угловая скорость и $e_i$ – орт оси его вращения в теле носителя.

Закон изменения момента количества движения рассматриваемой механической системы относительно центра масс при переходе к операции дифференцирования в пространстве, связанном с телом, можно записать в виде следующего векторного уравнения Эйлера

$$I\dot{\omega} + \omega \times I\,\omega + \sum G_i\,(\ddot{\varphi}_i e_i + \dot{\varphi}_i \omega \times e_i) = M_0,$$

где $M_0$ – известный момент внешних сил, который включает гравитационное взаимодействие, аэродинамическое и световое давление.

Ввиду равенства поперечных моментов инерции ротора уравнение Эйлера для проекции на его ось вращения имеет вид $G_i \dot{\varphi}_i = Q_i$, $\omega_i = \dot{\varphi}_i + (e_i, \omega)$. Здесь $Q_i$ – проекция момента, приложенного к ротору. Это момент внутренних сил, который можно рассматривать как управляющий. В результате имеем

$$G_i\,(\ddot{\varphi}_i + (e_i \cdot \dot{\omega})) = Q_i.$$

Пусть $\tau$ – неподвижный единичный вектор; $e$ – единичный вектор, связанный с носителем. Ставится задача выбора суммарного управляющего момента

$$Q = \sum Q_i \cdot e_i$$

таким, чтобы выполнялось условие: $e \to \tau$ при $t \to \infty$.

Справедливо следующее утверждение.

Пусть матрица $D = I - \sum \mathrm{G}_i\, e_i\, e_i^*$ – неособенная. Здесь через $e_i^*$ обозначен вектор, транспонированный по отношению к $e_i$. Пусть среди ортов $e_i$ имеются три линейно независимых. Примем

$$Q = M_0 - \omega \times I\omega - \sum G_i\,\omega \times \dot{\varphi}_i e_i + D\,I^{-1}\,(\omega \times I\omega - M).$$

Система уравнений движения при выбранном управлении $Q$, где

$$M = -\omega + k \cdot e \times \tau.$$

имеет состояние равновесия носителя $e = \pm\,\tau$, $\omega = 0$, каждое из которых асимптотически устойчиво по отношению к $\omega$ и $e$**.** При этом любое движение, для которого начальное значение вектора $e \neq -\tau$, при надлежащем выборе $k$ будет удовлетворять условию $e \to \tau$**,** $\omega \to 0$ при $t \to \infty$.

### Заключение

Разделение уравнений на движение носителя и относительные перемещения других тел или частиц позволяет решать задачи управления космическими аппаратами и стабилизации при заданной ориентации, используя выбор необходимого управления с учетом внутренних перемещений тел или частиц.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 10-08-01046).

### Литература

1. Белецкий В.В. Движение спутника относительно центра масс в гравитационном поле. – М.: МГУ, 1975. – 308 с.
2. Гродзовский Г.Л., Иванов Ю.Н., Токарев В.В. Механика космического полета. – М.: Наука, 1966.
3. Зубов В.И. Аналитическая динамика системы тел. – Л.: ЛГУ, 1983. – 344 с.
4. Красовский Н.Н. Теория управления движением. – М.: Наука, 1968. – 476 с.

5. Лоуден Д.Ф. Оптимальные траектории для космической навигации. – М.: Мир, 1966. – 152 с.
6. Новоселов В.С. Аналитическая механика систем с переменными массами. – Л.: ЛГУ, 1969. – 240 с.
7. Новоселов В.С. Аналитическая теория оптимизации в гравитационных полях. – Л.: ЛГУ, 1972. – 317 с.
8. Охоцимский В.Е., Сихарулидзе Ю.Г. Основы механики космического полета. – М.: Наука, 1990. – 448 с.
9. Новоселов В.С., Королев В.С. Об управлении возмущенной гамильтоновой системой // Автоматика-96. Тезисы докладов. Т. 1. – Севастополь, 1996.
10. Королев В.С. Об управлении движением механической системы при переменном распределении массы тел // Известия РАЕН, серия МММИУ. – 2000. – Т. 4. – № 4 – С. 108–117.
11. Королев В.С. Об управлении движением в гравитационном поле с учетом возмущений // Третьи Поляховские чтения. Тезисы докладов. – СПб: СПбГУ, 2003. – С. 95–96.
12. Королев В.С., Пахомов А.А. Моделирование движения и взаимного расположения системы космических тел // Процессы управления и устойчивость. Сборник трудов конференции. – СПб: СПбГУ, 2004. – С. 205–210.
13. Королев В.С. Определение движения навигационных спутников с учетом возмущений // Вестник СПбГУ. – 2004. – Сер. 10. – Вып. 3. – С. 39–46.
14. Новоселов В.С., Королев В.С. Аналитическая механика управляемой системы. – СПб: СПбГУ, 2005. – 298 с.

***Королев Владимир Степанович*** – Санкт-Петербургский государственный университет, кандидат физ.-мат. наук, доцент, vokorol@bk.ru

***Кравчук Раиса Юрьевна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, ggarotta@gmail.com

**УДК 521.35:[528.837:629.78]**

# АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ РАЦИОНАЛЬНОСТИ ПОСТРОЕНИЯ НИЗКООРБИТАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННЫХ СПУТНИКОВ МОНИТОРИНГА НАЗЕМНЫХ ОБЪЕКТОВ

**А.И. Пикуль, Д.К. Хегай, А.В. Шпак**

Предлагается алгоритм, позволяющий производить оценивание информационных возможностей космической системы при различных вариантах ее орбитального построения с учетом характеристик входящих в нее искусственных спутников Земли и объектов мониторинга.

**Ключевые слова:** искусственный спутник Земли, космическая система, рациональное построение баллистической структуры системы ИСЗ, мониторинг наземных объектов.

## Введение и постановка задачи

Для проведения космического мониторинга наземных объектов, как правило, используется низкоорбитальная система искусственных спутников Земли (ИСЗ). При этом для решения стоящей целевой задачи с требуемым качеством могут использоваться различные варианты ее орбитального построения [1]. В ряде случаев создается избыточность информационных ресурсов системы, что неоправданно увеличивает ее стоимость и сложность. Также при функционировании системы ИСЗ на этапе ее развертывания или при несвоевременном восполнении ее численности может возникнуть ситуация, когда на поверхности Земли формируются зоны, где целевая задача в определенные моменты времени не решается с требуемым качеством. Таким образом, создание новой космической системы мониторинга наземных объектов целесообразно начинать с выбора баллистической структуры, обеспечивающей решение целевой задачи с требуемой эффективностью при заданных ограничениях.

Эффективность системы, как правило, характеризуется ее информационными возможностями – периодичностью наблюдения объекта (для неподвижных объектов), а также средней вероятностью обнаружения объекта с учетом допустимого времени устаревания данных (для подвижных объектов). Ограничениями могут являться общая стоимость создания системы, число ИСЗ в системе, количество, местонахождение и специфические особенности потребителей информации системы и др. Рациональность построения системы определяется минимумом затрат на ее создание при условии достижения требуемой эффективности ее работы.

Для решения этой сложной задачи целесообразно использовать модели и методы оценки информационных возможностей космических систем при различных вариантах их баллистического построения, реализованные в виде аналитических или статистических алгоритмов.

### Алгоритм оценивания рациональности построения баллистической структуры системы ИСЗ мониторинга наземных объектов

При рассмотрении вопросов, связанных с построением низкоорбитальной системы ИСЗ, большое значение имеет моделирование процесса ее функционирования. Представляется, что в состав алгоритма, реализующего процесс моделирования баллистической структуры (БС) низкоорбитальной космической системы мониторинга, целесообразно включить расчетные процедуры, позволяющие осуществлять [2]:

- расчет параметров трассы полета ИСЗ;
- расчет параметров полосы обзора ИСЗ;
- формирование признака накрытия полосой обзора ИСЗ заданного района;
- имитацию неопределенности положения объекта мониторинга (ОМ) в районе;
- формирование признака попадания объекта в полосу обзора ИСЗ;
- формирование признака фиксации объекта мониторинга бортовой аппаратурой мониторинга (БАМ) ИСЗ;
- расчет параметров области возможного положения объекта мониторинга (ОВПОМ);
- расчет параметров круга связи;
- формирование признака приема информации на пункте приема информации (ППИ);
- формирование признака распознавания объекта на ППИ;
- выбор показателей и оценку эффективности применения и возможностей низкоорбитальной системы ИСЗ;
- формирование признака захвата ОМ по долготе;
- формирование признаков уклонения ОМ от средств БАМ ИСЗ;
- формирование предложений по построению баллистической структуры системы ИСЗ.

Для исследования информационных свойств космической системы большой практический интерес представляет определение периодичности обнаружения объекта мониторинга. Известно два подхода к решению этой задачи: аналитический и статистический. Достоинством аналитического подхода является то, что он позволяет сравнительно просто определить среднюю периодичность наблюдения ОМ в заданном районе, а недостатком – отсутствие возможности определять минимальные, максимальные и текущие интервалы времени между последовательными обнаружениями ОМ. Для определения этих интервалов и оценки вероятности того, что временные интервалы между обнаружениями ОМ не превысят заданных значений, целесообразно воспользоваться статистическим подходом, основанным на моделировании процесса функционирования системы.

Расчет параметров трассы полета, полосы обзора ИСЗ и круга связи с ППИ осуществляется стандартными процедурами, достаточно широко рассмотренными в литературе [1, 2]. Формирование признака накрытия полосой обзора ИСЗ заданного района осуществляется путем сопоставления текущих параметров движения ИСЗ с учетом ширины полозы обзора БАМ с географическими границами заданного района подстилающей поверхности. В качестве основного показателя эффективности применения системы целесообразно использовать среднее значение вероятности обнаружения ОМ $W_z$ на мерном интервале, рассчитываемое с учетом допустимого времени устаревания данных $\Delta T_{\text{уст}}$

$$W_z = \frac{1}{D_j}\sum_{i=1}^{k} S_i \quad .$$

Здесь $k$ – количество шагов по времени, когда текущее значение вероятности обнаружения ОМ отлично от нуля, $k = 1 \ldots K$; $i$ – номер шага по времени, когда текущее значение вероятности обнаружения отлично от нуля; $K = \dfrac{\Delta T_{\text{уст}}}{\Delta t}$; $S_i$ и $D_j$ – параметры, используемые при обработке результатов моделирования: $S_i = P_i \cdot \Delta t$, $D_j = \Delta t \cdot n_j$; $\Delta t$ – размер шага по времени; $j$ – номер шага по времени на интервале оценки $T_{\text{оц}}$, $j = 1 \ldots E\,(T_{\text{оц}} / \Delta t)$; $n_j$ – общее количество шагов по времени; $P_i$ – текущее значение вероятности обнаружения за время мониторинга ОВПОМ

$$P_i = \frac{n_{p\,i}(t_y < \tau)}{n_{\Sigma\,i}},$$

где $n_{p\,i}(t_y<\tau)$ – количество распознанных (обнаруженных) объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ в заданной ОВПОМ и имеющих время устаревания данных меньше допустимого; $n_{\Sigma\,i}$ – суммарное количество объектов.

Имитация неопределенности положения ОМ в районе ОВПОМ производится с помощью специальной процедуры. Исходными данными для ее реализации являются прогнозируемое (или расчетное) положение ОМ на момент наблюдения, а также область возможных отклонений фактического положения ОМ от расчетного. В процессе ее выполнения к расчетному положению ОМ добавляются случайные от-

клонения по широте и долготе с использованием псевдослучайных чисел и априорно известного закона распределения. Область возможных отклонений рассчитывается, исходя из известного местоположения ОМ на момент предыдущего наблюдения, предельно допустимой или средней скорости движения ОМ, а также возможностей маневрирования ОМ с учетом особенностей рельефа.

Для наглядности описания периодического обнаружения ОМ информационными средствами системы мониторинга можно построить график, на котором отображается соответствующим символом обнаружение или необнаружение каждого объекта, имитирующего неопределенность положения ОМ на интервале оценки, что позволяет измерить интервалы между обнаружениями и, в конечном итоге, определить периодичность обнаружения ОМ и отобразить ее в форме гистограммы – статистической плотности распределения временных интервалов между обнаружениями с заданной дискретностью (рис. 1, 2).

Формирование признаков попадания ОМ в полосу обзора ИСЗ и захвата ОМ по долготе осуществляется путем сопоставления текущих параметров движения отдельных ИСЗ с параметрами, характеризующими расчетное положение ОМ на момент наблюдения. Формирование признака фиксации объекта БАМ производится путем сопоставления обнаружительной способности БАМ реальным условиям наблюдения ОМ.

Считается, что ОМ уклоняется от обнаружения БАМ ИСЗ, если случайное число $r$ окажется больше, чем вероятность обнаружения ОМ в условиях сложнопрогнозируемой радиоэлектронной обстановки $p_{\text{РЭО}}$. Признак уклонения описывается функцией обнаружения $\text{Пр}_{\text{укл}}^{\text{РЭО}}$

$$\text{Пр}_{\text{укл}}^{\text{РЭО}} = \begin{cases} 1, & \text{при} \quad r \le p_{\text{РЭО}}; \\ 0, & \text{при} \quad r > p_{\text{РЭО}}. \end{cases}$$

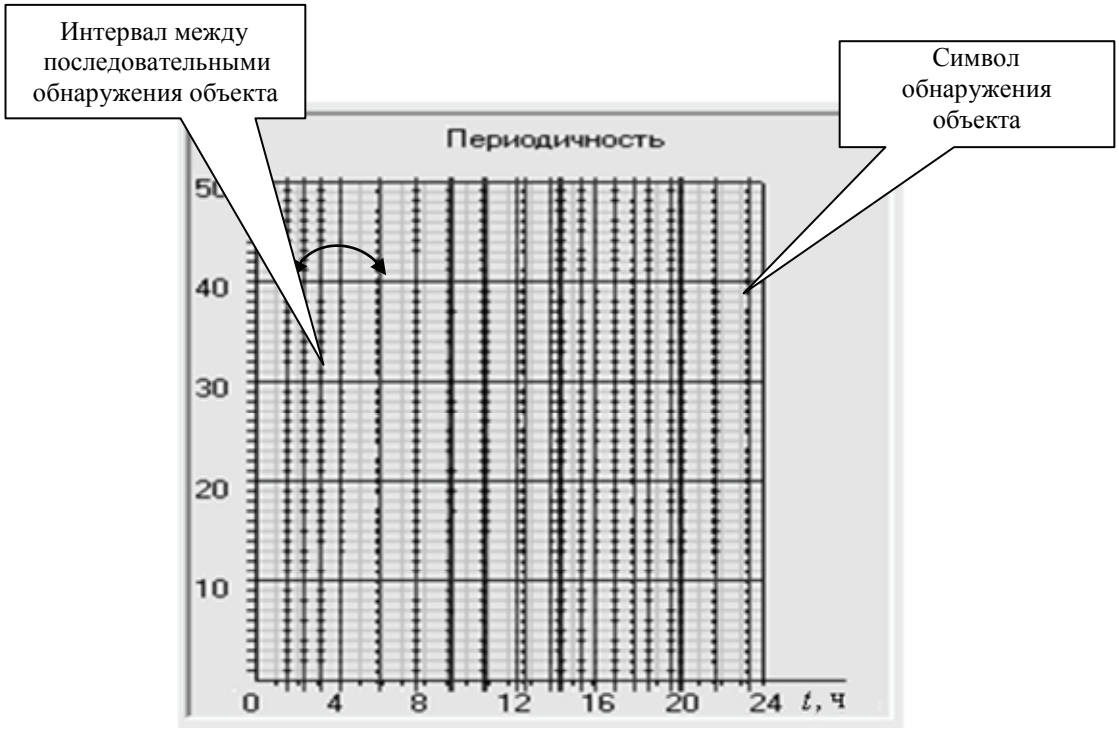



Рис. 1. Графическое представление временных интервалов между обнаружениями объектов, имитирующих неопределенность положения ОМ

При уклонении ОМ от обнаружения каналом радиолокационного мониторинга ИСЗ определяется скорость уклонения на интервале оценки, которая, в свою очередь, зависит от ряда параметров, наиболее значимыми из которых являются количество ИСЗ в системе, баллистическая структура системы (долготы восходящих узлов каждого ИСЗ), захваты по долготе на заданной широте и текущая широта маршрута перехода:

$$V_{\text{укл}} = f(N_{\text{ИСЗ}}, \Omega_i, \Delta\lambda_0, \varphi_{\text{м}}) \ ,$$

где $N_{\text{ИСЗ}}$ – количество ИСЗ в системе; $\Omega_i$ – долгота восходящего узла $i$-го ИСЗ; $\Delta\lambda_0$ – ширина полосы захвата по долготе на широте проведения мониторинга; $\varphi_{\text{м}}$ – текущая широта маршрута перехода.

Если объект мониторинга (с какой бы скоростью он ни двигался) при каждом пролете ИСЗ над ним постоянно попадает в полосу обзора канала радиолокационного мониторинга, то формируется признак неуклонения от обнаружения; в противном случае объект может уклониться от обнаружения (на всем интервале оценки или в пределах его некоторой части)

$$\Pi p_{укл}^{РЛМ} = \begin{cases} 1, & \text{при } V_{укл} = 0, \\ 0, & \text{при } V_{укл} > 0. \end{cases}$$

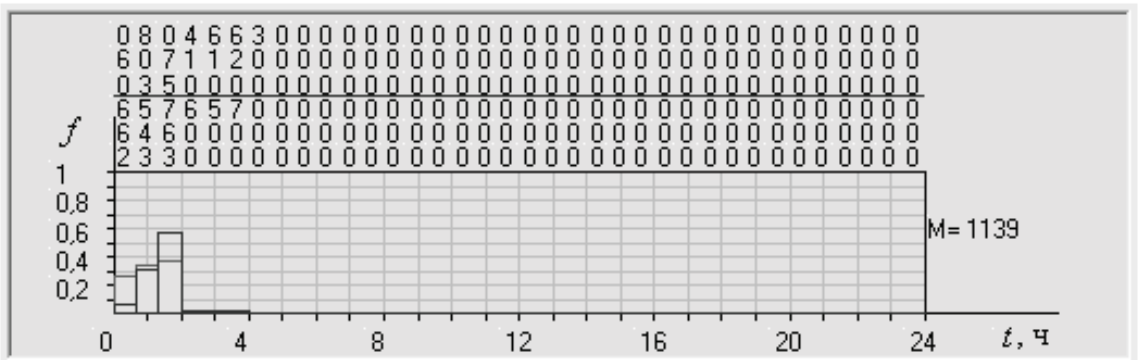



Рис. 2. Построение закона распределения временных интервалов между обнаружениями объектов

В процессе наращивания числа ИСЗ в системе должно обеспечиваться максимальное значение выбранного показателя эффективности ее применения – средней вероятности обнаружения ОМ [3, 4].

$$W_z \Rightarrow \max . \qquad (1)$$

На каждом шаге процесса наращивания БС фиксируются значения долгот восходящих узлов предыдущих ИСЗ и изменяется долгота восходящего узла текущего ИСЗ:

$\Omega_{N-1}$=const;

$\Omega_N$=var;

При этом должна обеспечиваться невозможность уклонения ОМ от обнаружения ИСЗ (канала) радиолокационного мониторинга, т.е.

$$\Pi p_{укл} = 0 . \qquad (2)$$

Совместное выполнение условий (1) и (2) обеспечивает рациональность построения баллистической структуры системы ИСЗ для заданной достоверности обнаружения ОМ.

Алгоритм, который позволяет осуществлять все необходимые расчеты, связанные с обоснованием вариантов рационального построения баллистической структуры космической системы мониторинга, представлен на рис. 3. Этот алгоритм был реализован в виде программного комплекса и в настоящее время используется для оценивания эффективности использования информационных возможностей и рациональности построения группировок ИСЗ мониторинга наземных объектов.

Адекватность использованной модели оценивалась путем сравнения результатов моделирования с данными проведения мониторинга наземных объектов с помощью бортовой регистрирующей аппаратуры ряда функционирующих орбитальных группировок ИСЗ [5]. Относительное отклонение оценки информационных возможностей системы во всех случаях не превысило 3%. Кроме того, моделирование позволило получить альтернативный вариант орбитального построения системы ИСЗ, при котором оценка информативности выросла на 15%.

**Заключение**

В общем случае рациональное построение баллистической структуры низкоорбитальной космической системы мониторинга целесообразно осуществлять, исходя из следующих соображений:

- количество ИСЗ в системе не превысит некоторого максимального значения, обеспечивающего требуемое значение показателей эффективности применения системы;
- наращивание численности ИСЗ (запуск очередного ИСЗ) должно обеспечивать максимум эффективности применения системы по всем заданным районам мониторинга;
- параметры орбит ИСЗ должны выбираться с учетом возможного уклонения подвижных ОМ от предполагаемого района обнаружения.

Разработанная математическая модель и алгоритм на ее основе могут быть положены в основу создания методики оценки эффективности применения низкоорбитальной космической системы мониторинга при ее рациональном построении.

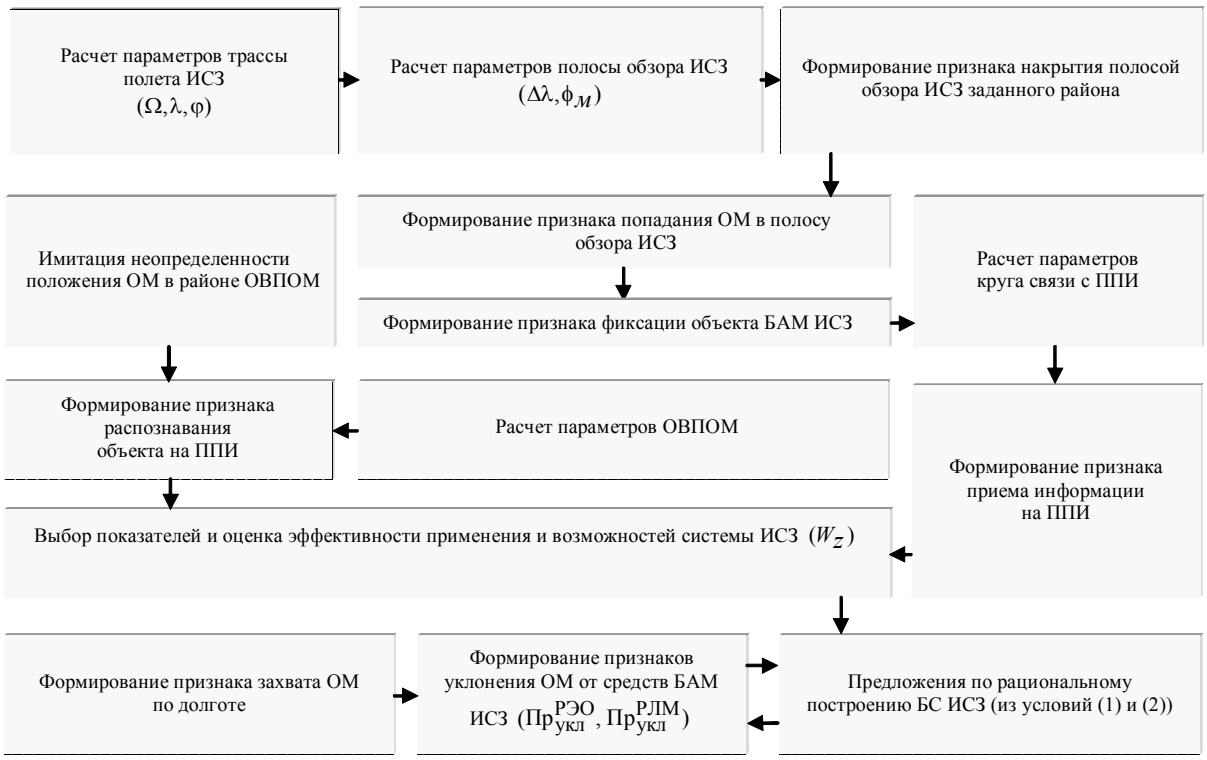



Рис. 3. Схема реализации алгоритма оценивания рациональности построения БС системы ИСЗ

**Литература**

1. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г.С. Нариманова, М.К. Тихонравова. – М.: Машиностроение, 1972.– 608 с.
2. Калинов М.И. Методика оценки эффективности применения космических систем наблюдения // Сборник трудов 6-й Всероссийской НПК «Актуальные проблемы защиты и безопасности». – СПб: НПО СМ, 2003.– С. 53–78.
3. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1986.– 544 с.
4. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1968. – 356 с.
5. Макаренко Д.М., Потюпкин А.Ю. На орбитальных рубежах. – М.: Академия, 2008. – 280 с.

***Пикуль Анатолий Иванович*** – ФГУП «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга», г. Москва, заместитель генерального директора, post@cnirti.ru

***Хегай Дмитрий Климович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела, hdk_2004@mail.ru

***Шпак Александр Васильевич*** – ФГУП «ЦНИРТИ им.академика А.И. Берга», г. Москва, кандидат технических наук, главный конструктор, Juls_s@inbox.ru

# 5 ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ. ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 658.5

## СИСТЕМНАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ И ИЗГОТОВЛЕНИИ ИЗДЕЛИЙ В СРЕДЕ РАСШИРЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

**А.А. Грибовский**

Рассматриваются особенности взаимодействия внутри расширенного предприятия на протяжении жизненного цикла изделия. Описывается способ корректной передачи данных между участниками расширенного предприятия.
**Ключевые слова:** расширенное предприятие, интерфейсы трехмерных моделей, форматы передачи данных.

### Введение

Современное развитие технологий изготовления новых изделий наглядно демонстрирует тенденцию к ускорению производства и сокращению сроков выхода продуктов на рынок, поэтому сейчас как никогда остро встает вопрос об организации структуры, поддерживающей такие темпы производства. В качестве одного из решений для быстрого реагирования на запросы рынка, а также объединения под общим проектом специализированных центров и отдельных производств, используется расширенное предприятие (РП), выстраивающее всю цепочку изготовления из отдельных производственных площадок и информационных структур.

### Учет внутренних связей при функционировании РП

Под РП понимается совокупность всех организаций и частных лиц, принимающих участие в создании нового изделия. РП основывается на выявлении производителем комплектного оборудования (Original equipment manufacturer, OEM-предприятием) своих наиболее сильных сторон (так называемых стержневых компетенций) и ведении самостоятельных работ только в рамках этих компетенций. РП строится по образу и подобию обычных предприятий, что позволяет заказчикам не вникать в особенности структуры. Однако РП имеет значительно более динамичный характер по сравнению с традиционными предприятиями [1].

Это приводит к необходимости использования специальных средств для налаживания связей внутри предприятия, что, в свою очередь, требует реализовать передачу информации от этапа к этапу, используя унифицированный набор данных. При этом важно, в каком виде получаются данные и как они должны передаваться дальше. В результате при организации кооперации становятся критичными особенности связей с предыдущим и последующим этапами.

Моделирование будущего изделия включает в себя ряд процессов, имеющих большое значение в подготовке производства. Создание качественного изделия с минимальными затратами требует выполнять анализ конструкции либо после этапа проектирования, либо во время него. При этом возникает необходимость в наличии такого интерфейса моделирования, который, с одной стороны, позволит передавать данные с этапа на этап без потерь и, с другой стороны, упростит обработку и анализ моделей. Использование в качестве интерфейса передачи данных внутренних стандартов различных CAD/CAM систем сопряжено с рядом проблем. К таким проблемам следует отнести существенную ограниченность доступа к структуре стандартов. Безусловно, средства программирования, имеющиеся во многих системах трехмерного моделирования, позволяют проводить обработку внутренних атрибутов моделей, но они привязаны к конкретной платформе, поэтому их использование в среде РП сопряжено с рядом проблем.

В такой ситуации логично использовать другой тип трехмерных моделей, так называемые форматы-интерфейсы, разработанные для передачи данных от системы к системе. Форматы-интерфейсы, имеющие постоянную поддержку и обновления, позволяют на высоком уровне передавать информацию о модели с включением разных типов данных. Среди самых распространенных форматов следует выделить SAT/SAB (ACIS-ядро), STEP и IGES. При этом формат SAT/SAB передает в основном трехмерную геометрию с упором на обработку примитивов, а IGES и STEP являются форматами-контейнерами с широкими возможностями хранения данных. Сама трехмерная модель может состоять либо из примитивов, либо иметь представление в виде точек (аналогично ASCII или STL). Возможность SAT сохранять примитивы часто используется в системах измерения типа контрольно-измерительных машин. Развитие формата IGES на данный момент сильно ограничено, и его обошли стороной многие современные тенденции в трехмерной графике, но, несмотря на это, он все-таки часто используется для передачи геометрии со структурой низкой сложности. Стандарт STEP имеет в своем составе ряд специализированных форматов, объединенных унифицированной структурой, с использованием специализированного языка EXPRESS для записи широкого спектра различных данных [2].

### Определение стандарта взаимной интеграции подразделений РП

Для успешного использования определенного формата трехмерных моделей в целях улучшения коммуникации в среде РП ему необходимо обладать рядом характеристик. Во-первых, формат должен иметь открытую и свободно редактируемую структуру, что необходимо для внесения изменений, получения требуемых данных и организации доступа к информации, хранимой в модели. Во-вторых, формат должен поддерживать основные существующие классы трехмерных моделей. В-третьих, разработчики формата должны учитывать тенденции развития систем трехмерного моделирования и поддерживать новые разработки, что позволит сохранить актуальность формата на всех этапах жизненного цикла изделия (ЖЦИ). Также формат должен поддерживать обмен данными со стандартами CAD/CAM-систем и иметь расширяемую внутреннюю структуру для максимальной интеграции в ЖЦИ.

Наиболее полно этим требованиям соответствует стандарт STEP (STandart for Exchange of Product model data – Стандарт обмена данными модели изделия), который продолжает развиваться и уже имеет ряд ответвлений в соответствии со сферами применения. В основу проекта STEP положено утверждение о том, что информация об изделии используется на всех этапах жизненного цикла. Для обмена информацией возможны два варианта построения взаимодействий – непосредственный обмен между приложениями и обмен данными через «нейтральный» стандарт [3].

Внутренняя структура моделей, таким образом, представляется в виде набора элементов и ряда перекрестных ссылок, отражающих состав моделей и указывающих на взаимозависимость отдельных частей. В результате можно получить параметры каждого элемента за счет анализа его атрибутов и учета связей с другими элементами. Наличие такой «древовидной» структуры, с одной стороны, требует специализированных механизмов поиска характеристик элементов, а с другой стороны – дает возможность обрабатывать части моделей с учетом внутренних связей. Подобный подход позволяет создавать дополнительные ссылки на такие специализированные элементы, как аннотации или комментарии проектировщиков. Общий принцип такого взаимодействия представлен на примере характеристик цилиндрической поверхности (рис. 1).

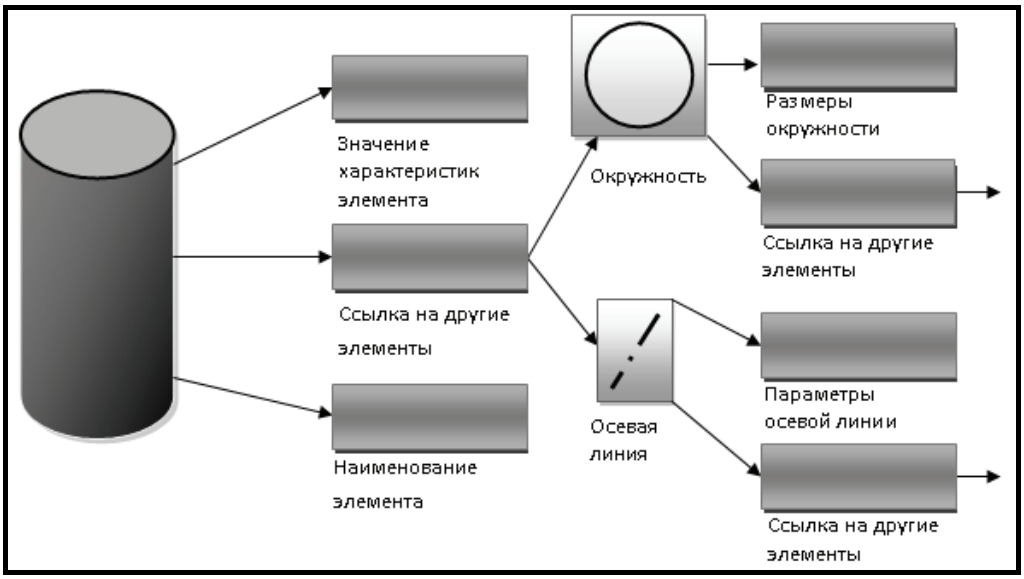



Рис. 1. Извлечение информации о цилиндрической поверхности на основе анализа характеристик и внутренних ссылок

### Использование внутренней структуры моделей на этапах ЖЦИ

ЖЦИ начинается с определения эксплуатационных требований и непосредственного проектирования изделия. При этом создаваемая конструкция должна отвечать также требованиям технологичности, которые подразумевают подбор наиболее эффективных принципов изготовления, в первую очередь учитывающих экономическую целесообразность. Процесс согласования конструкции, в котором участвует технолог и проектировщик, потребует тем больше времени, чем сложнее изделие и чем хуже взаимная коммуникация. Для ускорения данного процесса может использоваться подход на основе однотипных трехмерных моделей и анализа взаимного расположения элементов модели с последующим сравнением их с уже существующими деталями, имеющими отработанные техпроцессы. Таким образом, значительно автоматизируется работа технолога и упрощается передача данных проектировщику. В результате, для получения финальной конструкции требуется значительно меньше итераций и, как следствие, меньше временных затрат. Подобная схема взаимодействия обладает другим явным преимуществом, заключаю-

щимся в отсутствии необходимости оснащения рабочего места технолога специализированным программным обеспечением (ПО) и проведением обучения по работе с этим ПО. При этом модификация модели может производиться напрямую за счет средств работы с внутренним текстом формата. Таким образом, происходит значительная экономия ресурсов и снижаются требования, предъявляемые к специалисту для выполнения работ с моделью.

После утверждения конструкции начинается этап подготовки вариантов изготовления изделия и непосредственно конфигурирование РП. Для изготовления изделий в первую очередь имеет значение точность различных элементов. Также большую важность имеет описание конструктивно-технологических элементов (КТЭ), входящих в состав модели.

КТЭ – это группы примитивов (фаски, уступы, пазы и т.п.), которые выступают в роли основной структурной единицы изделия и обрабатываются при изготовлении, поэтому на их основе можно сформировать ориентировочные варианты производства. С учетом структуры форматов моделей группирование примитивов и формирование КТЭ может быть реализовано в автоматическом режиме. Таким образом, для каждого набора примитивов должно быть соответствующее описание, включающее:

- положение базового элемента группы в общей системе координат модели;
- состав примитивов КТЭ и их параметры;
- взаимное расположение примитивов относительно друг друга.

Также при анализе существующих изделий и их КТЭ может быть создана определенная классификация, которая позволит добавить в описание группы примитивов соответствующий код, однозначно характеризующий возможные средства обработки данной группы. В результате, используя КТЭ и базу уже существующих проектов, можно подготовить набор возможных вариантов изготовления, т.е. сделать вариативные планы изготовления. Далее, используя перечень доступных ресурсов, конфигурируется один или несколько вариантов РП. Непосредственное конфигурирование РП производится при сравнении вариантов в соответствии с критериями оптимизации.

После определения состава исполнителей начинается распределение информации. Сначала модели передаются на этапы и загружаются в соответствующее ПО. При необходимости может быть организовано конвертирование во внутренний формат определенной системы трехмерного моделирования за счет внутрисистемных обработчиков. Сам процесс изготовления слабо зависит от внешней коммуникации, поэтому его рассмотрение оставим за рамками работы.

После получения изделия проводится контроль, включающий обмер на современном измерительном оборудовании, которое обычно работает с данными трехмерных моделей. При этом зачастую для составления плана контроля используются средства распознания элементов конструкции в автоматическом режиме (рис. 2). Однако операторам измерительного оборудования приходится вводить все параметры для контроля, включая точность элементов и отклонения формы, вручную. Учет особенностей структуры модели в сочетании со средствами программирования соответствующего измерительного устройства позволяет получать необходимые параметры в автоматическом режиме.

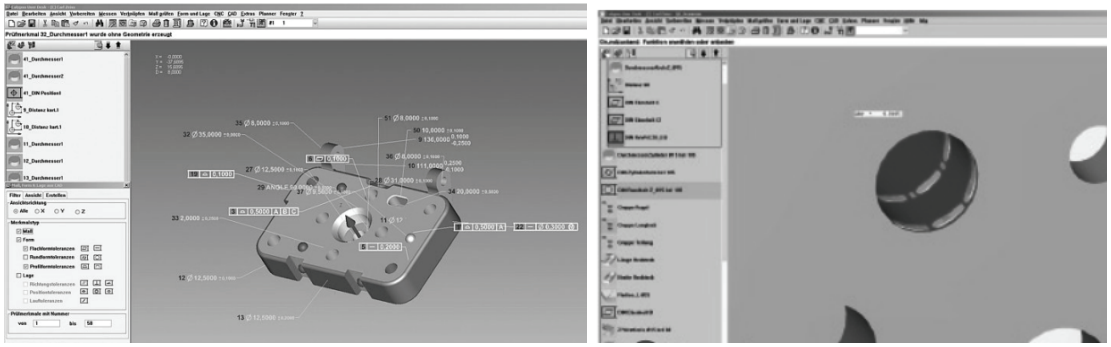


Рис. 2. Автоматическое распознание и добавление элементов модели в план контроля на примере системы управления измерительного оборудования

## Заключение

При создании изделий в рамках отдельно взятого предприятия вопросы взаимной коммуникации возникают в менее значительном масштабе по сравнению с РП, что позволяет считать подобные структуры самодостаточными с точки зрения описанных в работе вопросов. С другой стороны, динамический характер РП не позволяет наладить прочные связи, свойственные традиционным предприятиям, а также выдвигает специальные требования к средствам взаимодействия между отдельными участниками. В работе рассмотрена реализация совместной деятельности на основе применения унифицированного формата трехмерных моделей. Использование такого подхода позволяет оптимизировать процесс организации РП и получить ряд преимуществ перед традиционными подходами:

- упрощается коммуникация между этапами ЖЦИ;
- снижаются требования к специалистам, организующим РП;
- сокращается длительность большинства этапов и ускоряется выход продукта на рынок;
- существенно упрощается анализ структуры моделей и выявления КТЭ;
- обеспечивается непротиворечивость передачи данных из системы в систему;
- предоставляются широкие возможности для внедрения трехмерных моделей на специализированных этапах ЖЦИ.

Описанная схема использования унифицированных типов трехмерных моделей может применяться как для РП, так и для предприятий, имеющих гибкую структуру создаваемых проектов и требующих тесной интеграции между отделами, использующими различные программные средства.

**Литература**

1. Konsynski Benn. Strategic Control in the Extended Enterprise // European Journal of Information Systems. – February, 2007. – V. 16. – 71 p.
2. Douglas A. Schenck and Peter R. Wilson. Information Modeling the EXPRESS Way. – Oxford University Press, 1993. – 416 p.
3. ГОСТ Р ИСО 10303-1-99. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Часть 1. Общие представления и основополагающие принципы. – Введ. 01.07.2000. – М.: Госстандарт России, 2000. – 16 с.

***Грибовский Андрей Александрович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, griandrey@yandex.ru

**УДК 681.3**

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОЦЕДУР ВЫБОРА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ОЧЕРЕДЕЙ РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ

**Г.Л. Шкурина**

Описана методика планирования очередей ремонта оборудования с помощью процедур выбора. Оптимальные очереди оборудования на ремонт формируются на основе использования объективных критериев без введения метрики. Такой подход при разработке планов ремонта позволяет строить очереди по характеристикам ремонтопригодности оборудования с различной степенью информационной полноты.

**Ключевые слова:** планирование очередей ремонта оборудования, методы принятия решений, метрические методы выбора, автоматизированная система обслуживания и ремонта оборудования.

## Введение

В условиях инвестиционного кризиса невозможно повысить экономическую эффективность предприятия без совершенствования принципов и методов технического обслуживания и ремонта оборудования и управления производственными фондами. И хотя большинство предприятий признают реальную отдачу от использования специализированных систем автоматизации для этих целей, качество бизнес-процессов находится на весьма низком уровне.

По результатам исследования 350 российских фирм (декабрь 2008 г.) автоматизированные системы управления производственными фондами (EAM), технического обслуживания и ремонта оборудования (TOPO) установлены у 27% предприятий. В основном это предприятия нефтегазовой промышленности (52%), металлургии (22%), электроэнергетики и ЖКХ (12%), машиностроения (2%). Одновременно в развитых индустриальных странах экономический эффект от использования систем EAM/TOPO давно признан очевидным, так как затраты на ремонт растут на 10–15% в год.

В этой связи актуализируется задача разработки методики оптимального планирования ремонтов оборудования и реализации на их основе систем EAM/TOPO.

Вопросы обоснования планов вывода объектов в ремонт необходимо решать с применением многокритериального подхода по совокупности показателей качества и, прежде всего, текущей надежности, характеризующей состояние оборудования на данный момент времени. При этом окончательное выстраивание очередей должно учитывать не только состояние того или иного оборудования из однородных групп, но и его значимость, а также взаимосвязи в системе, стоимостные характеристики, потери от простоя и стратегические последствия различного характера.

Уже используемые системы EAM/TOPO основаны на статистических методах или методах экспертной оценки состояния оборудования. Однако методы, основанные на усредненных статистических данных, не могут предоставить полной и достоверной информации о техническом состоянии оборудования, так как на большинстве российских предприятий оборудование крайне изношено физически. И весовые коэффициенты, как показывает практика, назначаемые экспертами, носят крайне субъективный

характер и существенно зависят от степени компетентности лиц, принимающих решения (ЛПР), отсюда и достоверность самих целевых функций довольна низка.

С другой стороны, из теории исследования операций известно, что сравнение объектов по векторным, неметрическим, безусловным критериям Парето и Слейтера более объективно по своей природе, так как основано на бинарных (порядковых), а не на метрических соотношениях. К классу неметрических, порядковых критериев можно отнести и условный лексикографический критерий, в котором в качестве условия используется приоритет учитываемых показателей качества, а векторная задача разбивается на ряд скалярных [1]. Использование таких неметрических критериев несет меньше субъективных ошибок при установлении очередей на ремонт, чем при использовании критериев интегрального типа с весовыми коэффициентами [2, 3]. Наличие такой информации позволяет проектировать оптимальные бизнес-процессы, принимать рациональные и обоснованные решения по эксплуатации, техническому обслуживанию, ремонтам, модернизации и техническому перевооружению объектов.

**Обобщенный алгоритм построения очередей ремонта оборудования**

Обобщенная структура методики построения очередей на ремонт оборудования из однородных групп представлена на рис. 1 и включает следующие этапы:

1. подготовка исходных данных;
2. модельное описание данных об однородных объектах; формирование критериев с учетом назначенных экспертами показателей качества (ПК) и информированности ЛПР;
3. формирование критериев построения очередей по выбранным показателям качества;
4. первичное построение очередей по принятому критерию;
5. уточнение и коррекция предварительно установленных очередей с учетом стоимостных характеристик;
6. окончательная коррекция и утверждения очередей на ремонт.

На первом этапе подготовки исходных данных формируются однородные классы оборудования $\Omega$. На данном этапе необходимо выбрать модель формализованного описания оборудования. Для этого выделяются информативные технические показатели качества {ПК}, которые в полной мере характеризуют выработку оборудованием рабочего ресурса и потенциальной надежности объекта ремонта. Далее назначаются конкретные условия {У} и ограничения {О} на вывод оборудования в ремонт [2]. На этом же этапе требуется определиться со стоимостными показателями качества ремонта по каждому объекту из однородной группы.

На втором этапе описывают модель объекта ремонта с помощью технических характеристик его ремонтопригодности. На этапе модельного описания данных об однородных объектах их классифицируют на группы (числовые, символьные, графические). Затем данные представляются в виде реляционных структур и формируются массивы данных для объектов из однородных групп. И в конце структуры данные из реляционных преобразуются в ассоциативные с целью использования их для обработки данных аппарата булевой алгебры.

На следующем этапе формируются критерии выбора в очередь с учетом принятой совокупности {ПК}. Процедуры в п. 3.1, п. 3.2, выстраиваются по одной из ветвей в зависимости от информированности пользователя:

- формирование критериев построения очередей объектов на обслуживание и ремонт для информированных экспертов;
- формирование критериев построения очередей для слабоинформированных экспертов.

Первичные построения очередей по принятому критерию (процедуры п. 4.1, п. 4.2) осуществляются по разным алгоритмам в зависимости от принятых целевых критериев и дают возможность получить разные, но частично связанные между собой результаты. Прежде всего, строятся очереди на ремонт оборудования на основе безусловного критерия предпочтения (критерия Парето), в котором все показатели качества рассматриваемых объектов являются независимыми и не имеют приоритетов. Использование этого критерия позволяет выстроить порядки объектов по слоям Парето, коррекция которых экспертами после построения ряда осуществляется по стоимостным критериям. Метод может быть использован при очень слабой информированности ЛПР. При достаточно высокой информированности персонала, построение очередей на ремонт осуществляется на основе формирования линейных порядков с помощью *L*-критерия, который требует установления приоритетов ПК для рассматриваемых объектов.

На пятом этапе уточняются и корректируются предварительно установленные очереди. На этом этапе ведется учет стоимостных показателей бюджета ремонтов, а также других важных функциональных и тактических условий и ограничений для коррекции сформированного ранее (в п.п. 3, 4) порядка назначения очереди на ремонт.

Последний этап – окончательная коррекция и утверждение очередей на ремонт – является организационно-техническим этапом, основанным на согласовании общей технической политики отрасли или группы предприятий. Цель этапа – скорректировать взаимные несоответствия в сформированных планах

ремонта. Окончательная коррекция осуществляется для полного установления соответствий требованиям ТЗ и нахождения компромиссов между противоречивыми условиями и ограничениями на проект.

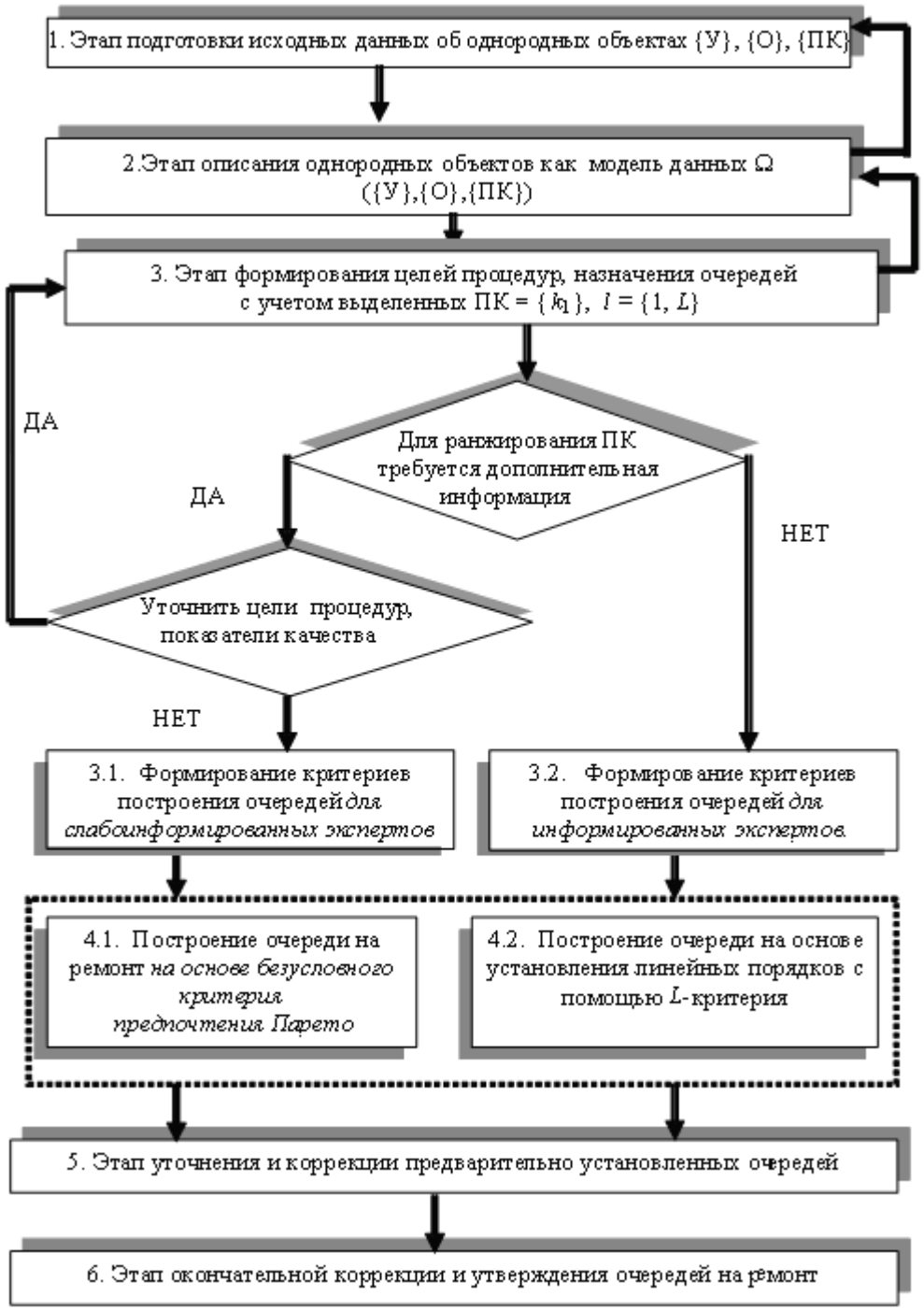



Рис. 1. Обобщенная структура методики формирования очередей

**Разные подходы установления порядков ремонта оборудования**

Рассмотрим предлагаемые подходы установления частичных или линейных порядков объектов, которые могут быть положены в основу назначения целесообразных очередей ремонтов, для персонала, обладающего различной степенью начальной информированности о техническом состоянии оборудования [2].

Для рассматриваемых объектов необходимо выделить набор информативных технических показателей качества, т.е. таких показателей, которые бы четко отражали данные о ремонтопригодности объекта. Однако часто нельзя достоверно установить приоритеты между ними. Этот факт и является показателем слабой информированности ЛПР. В этом случае для построения планов ремонтов при несравнимых и независимых показателях качества может использоваться критерий Парето ($\pi$-критерий) или критерий

Слейтера (*S*-критерий) [3]. Эти критерии позволяют строить порядки альтернатив на основе выделения π- или *S*-слоев.

Рассмотрим задачу установления порядка на примере критерия Парето. Для этого все исходное множество объектов Ω, согласно π-критерию, разбивается на линейно упорядоченные $\Omega_{\pi s}$-слои, задающие π-оптимальную структуру исходного множества, которая и закладывается в основу построения очереди на ремонт. При этом слои Парето $\Omega_{\pi s}$ определяются индуктивно.

К первому слою $\Omega_{\pi 1}$ относятся все $\pi_1$-оптимальные (концевые, неулучшаемые) альтернативы в подмножестве $\Omega_{\pi 1} = \max \Omega / R_k$, найденные из условия проведения бинарных сравнений на полном множестве Ω по отношениям

$$R_k: \{ k_l(\omega_i) \le k_l(\omega_j), \quad i \ne j; \ \{\omega_i, \omega_j\} \subseteq \Omega; \ \forall i, j = \{1, M\}; \forall l = \{1, N\}\},$$

в которых хотя бы для одного из них такое неравенство является строгим. Второй слой определяется как подмножество Парето $\Omega_{\pi 2} = \pi (\Omega \setminus \Omega_{\pi 1})$ на множестве $\Omega \setminus \Omega_{\pi 1}$, из которого удалены все элементы, принадлежащие первому, $\Omega_{\pi 1}$, слою Парето. Аналогично получаем выражения для последующих слоев Парето $\Omega_{\pi 3}$, $\Omega_{\pi 4}$, … $\Omega_{\pi s}$ на Ω. Полное исходное множество представляет собой объединение всех найденных слоев $\Omega = \Omega_{\pi 1} \cup \Omega_{\pi 2} \cup, \ldots, \cup \Omega_{\pi s}$.

Внутри каждого $\Omega_{\pi s}$-слоя все объекты несравнимы между собой, и каждый элемент из $\Omega_{\pi s}$ подмножества линейно упорядоченных слоев принадлежит ровно одному классу подмножеств расслоения по Парето на исходном множестве Ω.

Построение очередей на ремонт оборудования по критерию Парето может рассматриваться как способ задания порядка объектов линейным квазипорядком слоев, задающим модель системы предпочтений. Причем сама модель представления множества объектов в подобном виде вводится для описания задач с частично недоопределенной целью, в которых из-за слабой информированности ЛПР невозможно задать точное априорное назначение приоритетов показателей качества, а возможно лишь для формулирования π-постановки $\pi (\Omega / \{k_1, k_2 ...\})$ указать наборы несравнимых показателей качества $\{k_1, k_2 ...\}$. Идея таких расслоений, представленных на рис. 2, закладывается в основу построения очереди на ремонт.

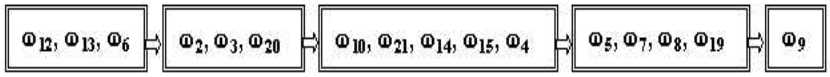



Рис. 2. Графическая интерпретация плана ремонтов, построенного на основе π-слоев

Слабая информированность ЛПР приводит (в результате применения критерия Парето) к неполному линейному порядку вариантов и несравнимости объектов в π-слоях.

Для достаточно информированного пользователя построение очереди на ремонт реализуется на основе установления линейных порядков объектов с помощью *L*-критерия. Для использования данного критерия ЛПР должен предварительно установить приоритеты показателей качества: $< k_1, k_2, \ldots >$.

Рассмотрим идею метода на примере, где все объекты, кроме $\omega_2$, являются допустимыми. Пусть экспертами заданы в качестве информативных два показателя качества $\{k_1, k_2\}$, причем ЛПР задал приоритет ПК: $< k_2, k_1 >$, что означает, что $k_2$ важнее, чем $k_1$.

Для удобства восприятия рассуждений можно изобразить график распределения вариантов в пространстве принятых показателей качества $k_1$ и $k_2$, а затем сформировать линейный порядок для $L_1(\Omega /< k_2, k_1>)$-критерия ($k_1 \to \min$, $k_2 \to \min$).

Для представленного примера можно констатировать, что линейный порядок вариантов при построении *L*-оптимального плана ремонта, полученный с помощью *L*-критерия $L_1(\Omega /< k_2, k_1>)$, начинается с варианта $\omega_{11}$: (min $k_2$), затем содержит несравнимые варианты $\{\omega_{12}, \omega_{13}\}$, $\{\omega_3, \omega_{23}\}$, $\{\omega_{14}, \omega_{15}\}$, которые могут стать различимыми с привлечением второго по важности ПК – $k_1$. Вариант $\omega_2$ по условию является недопустимым, поэтому он отсутствует в квазилинейном порядке.

Графически последовательность ремонтов объектов, построенная на основе *L*-критерия вида $L_1(\Omega/<k_2, k_1>)$, представлена на рис. 3.

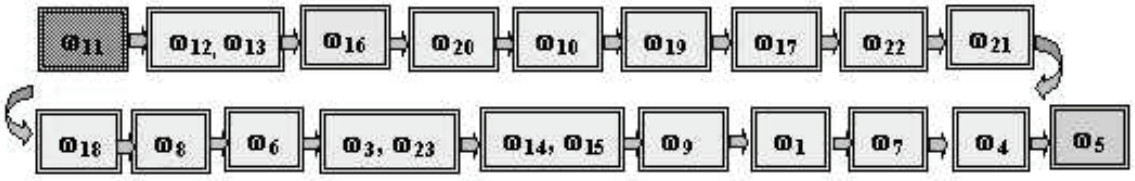



Рис. 3. Представление упорядоченного множества $\Omega^*$ в виде линейной структуры вариантов, полученной для $L_1(\Omega/<k_2, k_1>)$-постановки

Эта последовательность объектов задает квазилинейный порядок, который может быть положен в основу формирования окончательной очереди для планового ремонта. Окончательная коррекция плана должна учитывать стратегические, экономические и ряд косвенных частных факторов, способных оказать воздействие на параметры коррекции очереди, сформированной по техническим показателям. В связи с тем, что специфика подобной коррекции достаточно сильно привязана к конкретным задачам и к конкретным объектам, в рамках настоящей работы эти вопросы не рассматриваются, а на практике решаются методом экспертных оценок.

**Заключение**

В работе описана методика оптимизации планирования ремонтов объектов, основой которой являются процедуры выбора и неметрические критерии.

Методика апробирована на Волгоградском тракторном заводе и позволила выстроить порядки технологического оборудования для разработки текущих и перспективных планов ремонта и обслуживания. Отбор или формулирование технических характеристик, используемых для построения очередей ремонта – отдельная область исследования, требующая специальных знаний конкретного оборудования. Одни технические показатели могут быть общими для всех или многих групп, другие – относящимися только к конкретной марке техники. Методика позволяет скорректировать влияние информированности разработчиков планов на результат организованной очереди.

**Литература**

1. Кандырин Ю.В., Шкурина Г.Л., Сазонова Л.Т. Решение задач многокритериального выбора по последовательно принимаемым SpL-критериям //. Концептуальное проектирование в образовании, технике и технологии. Межвуз. сб. науч. тр. – Волгоград: ВолГТУ, 2000. – С. 96–100.
2. Кандырин Ю.В., Московский А.Е., Шкурина Г.Л. Методика формирования оптимальных очередей ремонтов по техническим характеристикам объектов // Журнал Известия ВолГТУ. Проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах. – 2007. – № 2 (28). – С. 95–99.
3. Шкурина Г.Л. Повышение надежности построения очередей ремонта оборудования // Системные проблемы надежности, качества информационно-телекоммуникационных технологий в инновационных проектах. Материалы XV международной конференции. Ч. 1. – М.: Энергоатомиздат, 2010. – С. 25–26.

***Шкурина Галина Леонидовна*** – Волгоградский государственный технический университет, кандидат технических наук, доцент, shgl@bk.ru

**УДК 620.19**

# АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

**Н.П. Лузина**

Классификация источников акустической эмиссии (АЭ) при выполнении контроля производственного объекта является одним из наиболее важных и принципиальных этапов АЭ-метода. Рассмотрены основные критерии оценки источников акустической эмиссии. Результаты анализа полученных из эксперимента данных показывают выполнение оценочных критериев при повторном нагружении. Также приводятся результаты анализа интенсивности АЭ-импульсов при полном испытании.

**Ключевые слова:** акустическая эмиссия, график нагружения, критерии акустической эмиссии, давление, преобразователи (датчики) акустической эмиссии.

**Введение**

Проблема обеспечения безопасной эксплуатации и эффективности работы сложных технических систем и оборудования опасных производственных объектов имеет в настоящее время особое значение. Существенный износ основного промышленного оборудования предполагает поиск новых подходов к решению задач, стоящих перед технической диагностикой.

Многообразие методов, применяемых в контроле качества материалов в промышленности, дает широкие возможности для всестороннего исследования объектов. Комплексное использование методов контроля позволяет гарантировать максимальную эффективность превентивных мер относительно различных дефектов. Обычно в диагностических исследованиях выделяют разрушающий и неразрушающий контроль. В нефтегазовой промышленности преимущественно используются разнообразные методы неразрушающего контроля (МНК). МНК базируются на наблюдении, регистрации и анализе результатов взаимодействия физических полей (излучений) или веществ с объектом контроля, причем характер этого взаимодействия зависит от химического состава, строения, состояния структуры контролируемого объ-

екта и т.п. Все МНК являются косвенными методами. Метода, который бы мог обнаружить самые разнообразные по характеру дефекты, нет. Каждый отдельно взятый МНК решает ограниченный круг задач технического контроля.

По характеру взаимодействия упругих колебаний с контролируемым материалом акустические методы подразделяют на следующие основные методы: прошедшего излучения (теневой, зеркально-теневой); отраженного излучения (эхо-импульсный); резонансный; импедансный; свободных колебаний.

Акустическая эмиссия (АЭ) отличается от большинства МНК в двух ключевых аспектах. Во-первых, источником сигнала служит сам материал, а не внешний источник, т.е. метод является пассивным (а не активным, как большинство других методов контроля). Во-вторых, в отличие от других методов АЭ обнаруживает движение дефекта, а не статические неоднородности, связанные с наличием дефектов, т.е. АЭ обнаруживает развивающиеся, а потому наиболее опасные дефекты.

Немалое преимущество метода АЭ связано с возможностью проведения неразрушающего контроля всего объекта целиком за один цикл нагружения. Данный метод является дистанционным, он не требует сканирования поверхности объекта для поиска локальных дефектов. Необходимо просто правильным образом расположить нужное число датчиков и использовать их для осуществления локации источника волн напряжений. Возможности, связанные с дистанционным использованием метода, дают большие преимущества по сравнению с другими методами контроля, которые требуют, например, удаления изоляционных оболочек, освобождения контейнеров контроля от внутреннего содержания или сканирования больших поверхностей.

Акустико-эмиссионный МНК основан на регистрации и последующей обработке параметров акустических сигналов ультразвукового диапазона и реализуется в процессе активного нагружения контролируемого объекта. Для проведения АЭ-диагностики к объекту контроля должны быть приложены статические и/или динамические нагрузки за счет повышения давления при гидравлических или пневматических испытаниях. Основной задачей АЭ-контроля является оценка технического состояния объекта по параметрам сигналов, отображающих информацию об источниках АЭ.

Существует проблема классификации источников АЭ и критериев оценки технического состояния объекта. Это специфично для метода АЭ, поскольку он позволяет связать параметры АЭ с параметрами предельного состояния объекта, которое характеризуется потерей прочности и его разрушением. Таким образом, разработка критериев предельного состояния объекта по параметрам АЭ является принципиальным моментом. Сам тип предельного состояния определяется проектировщиком оборудования и наступает при определенных условиях воздействия на объект. Разработчик методики АЭ-контроля должен получить набор параметров АЭ, характеризующих заданное предельное состояние. Критерием предельного состояния, как правило, является неравенство, которое удовлетворяется при некотором сочетании параметров АЭ и нагрузки.

Целью предлагаемого исследования является анализ выявленных областей повышенной АЭ-активности и классификация их по критериям предельного состояния при проведении акустико-эмиссионного контроля.

## Исследуемый объект и эксперимент

Аппарат для испытания представляет собой вертикальный сварной сосуд, состоящий из цилиндрической обечайки с приварными эллиптическими днищами длиной 5806 мм, диаметром 2000 мм, толщиной стенки 16 мм. Материал основных элементов – ВСт3. Рабочее давление равно 1,2 МПа. Тип и условия испытаний: гидравлическое; рабочее тело – вода; температура объекта +40°С, окружающей среды –1°С; марка нагружающего оборудования – поршневой насос; испытательное давление 1,52 МПа.

После выполнения подготовительных и настроечных работ производится нагружение объекта. В отличие от обычного гидро- или пневмоиспытания, нагружение при акустико-эмиссионном испытании производится по специальному графику, представленному на рис. 1. Как видно из графика, нагружение состоит из предварительного (на котором проверяется работоспособность всей аппаратуры, качество подготовки объекта к испытаниям, а также выявляются источники помех, связанные с трением опор) и рабочего (основного) испытания.

Предварительные испытания проводят при циклическом нагружении в начальной стадии нагружения в диапазоне (0–0,25) $P_{раб}$. По достижении давления $0{,}25P_{раб}$ (в данном случае 0,3 МПа) делается окончательная проверка работоспособности всего аппаратурного комплекса, уточняются и корректируются основные параметры АЭ-контроля и в течение 10 мин проводится запись шумов.

Рабочие испытания проводят при нагружении от $0{,}25\ P_{раб}$ до $P_{исп}$. Нагружение в этом диапазоне является наиболее ответственным и проводится при полном взаимодействии оператора – машиниста компрессора (насоса) и специалистов группы АЭ-контроля. На данном участке нагружения назначаются промежуточные выдержки.

При ступенчатом (со сбросом давления) нагружении сосуда видно, что АЭ при повторных нагружениях начинает регистрироваться по достижении максимальных нагрузок предыдущего нагружения (эффект Кайзера). Следовательно, можно сделать вывод, что при нагружении механические шумы не

влияют на результаты контроля, т.е. вся зарегистрированная АЭ связана с процессами деформирования материала. Такая проверка является важным методическим приемом при проведении контроля методом АЭ-сосудов высокого давления и трубопроводов.

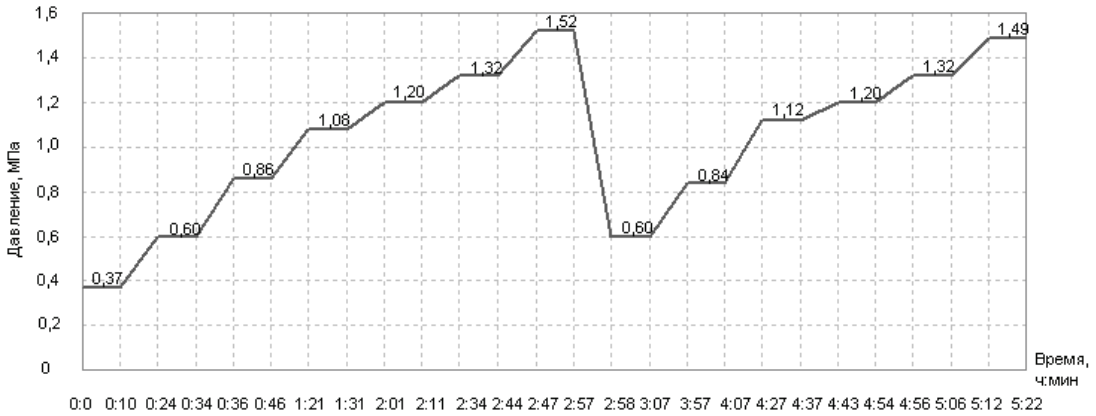



Рис. 1. График нагружения аппарата

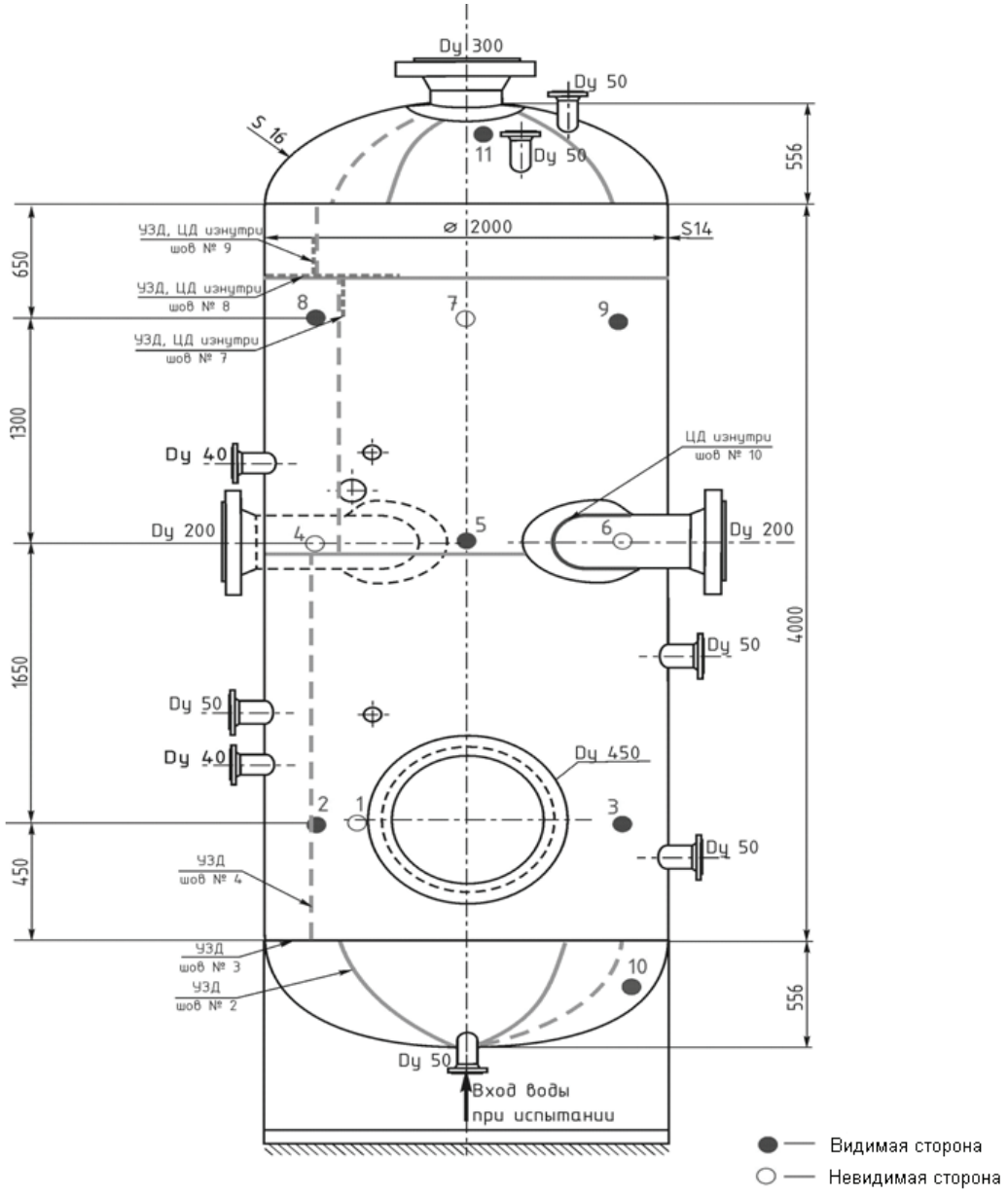



Рис. 2. Схема расположения преобразователей

Для приема и преобразования волн напряжений в электрические сигналы АЭ используются резонансные пьезоэлектрические преобразователи акустической эмиссии (ПАЭ) типа R15I-AST с резонансной частотой 150 кГц. Параметры преобразователей сохраняют стабильность в температурном диапазоне от – 45°С до + 85°С. Диаметр преобразователя составляет 29 мм. АЭ-преобразователи устанавливаются на поверхность контролируемого объекта через слой контактной среды и удерживаются с помощью магнитных держателей. При АЭ-контроле объектов из немагнитных материалов преобразователи крепятся при помощи клейкой ленты.

Преобразователи АЭ размещают на поверхности объекта, как правило, равномерно. Существует несколько схем размещения преобразователей АЭ: треугольная, прямоугольная, произвольная. В данном случае выбрана треугольная схема размещения датчиков, представленная на рис. 2.

После выполнения анализа качества данных и выбора оценочного диапазона нагружения данные АЭ контроля сравниваются с оценочными критериями, описанными ниже. Данные критерии определяются для каждого канала и отображают состояние контролируемой ПАЭ зоны. Если при оценке состояния объекта имеет место нарушение приведенных критериев, то должен быть выполнен дополнительный анализ данных для определения местоположения, активности и опасности источников АЭ.

Результаты анализа представлены в таблице, показывающей выполнение оценочных критериев при повторном нагружении. При построении таблицы приняты следующие допущения:

1. за допустимое количество импульсов на выдержках давления принято 7 импульсов на выдержку – оценка проводится с учетом допустимого уровня помех.
2. допустимое значение суммарной длительности АЭ-сигналов – 18542 мкс.
3. оценка скорости приращения суммарной энергии импульсов АЭ проводится для каналов, зарегистрировавших более 10 импульсов.

| № ПАЭ | Критерий 1 | | | | | Критерий 2 | Критерий 3 | Критерий 4 | Критерий 5 | Выполнение критериев |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Количество импульсов (шт.) на выдержках давления, МПа | | | | | Накопленная в процессе нагружения длительность, мкс | Количество импульсов АЭ, шт. | Импульсы АЭ высокой амплитуды (> 65 дБ), шт. | Скорость приращения суммарной энергии импульсов АЭ | |
| | 0,84 | 1,12 | 1,2 | 1,32 | 1,49 | | | | | |
| 1 | - | - | - | - | 1 | 1711 | 5 | 0 | не учитывается | выполнены |
| 2 | - | - | - | 1 | 5 | 11643 | 31 | **2** | **нарастает** | не выполнены |
| 3 | - | - | 1 | 1 | 3 | **71374** | **125** | **4** | **нарастает** | не выполнены |
| 4 | - | - | - | - | 4 | **33459** | 46 | **5** | **нарастает** | не выполнены |
| 5 | - | - | - | 1 | **10** | **29591** | 52 | **4** | **нарастает** | не выполнены |
| 6 | 1 | - | - | - | 1 | 13867 | 19 | 0 | **нарастает** | не выполнены |
| 7 | - | 2 | - | 1 | 7 | **34721** | **68** | 0 | **нарастает** | не выполнены |
| 8 | - | 1 | - | 1 | **14** | **51319** | **105** | **9** | **нарастает** | не выполнены |
| 9 | - | 1 | 1 | - | **8** | **23582** | **64** | **4** | **нарастает** | не выполнены |
| 10 | - | - | - | - | - | 6628 | 12 | 0 | **нарастает** | не выполнены |
| 11 | - | - | 1 | 3 | 6 | 13361 | 34 | **3** | **нарастает** | не выполнены |

Таблица. Выполнение критериев при повторном нагружении
(невыполненные критерии выделены жирным шрифтом)

**Анализ данных**

Принципиальным моментом является разработка критериев предельного состояния объекта по параметрам АЭ. В основу классификации положены значения параметров, которые в максимальной степени отражают техническое состояние объекта.

На рис. 3 представлены графики зависимостей основных параметров АЭ-сигналов, показывающих взаимосвязи между основными информативными параметрами при АЭ-контроле – амплитуда, энергия, длительность АЭ-импульса, импульс АЭ, время регистрации, регистрируемый канал.

Проведем содержательный анализ данных в соответствии с критериями для повторного нагружения.

*Критерий 1:* количество импульсов, зарегистрированных на выдержках давления, не должно превышать 7 импульсов на выдержку (с учетом допустимого уровня помех – 5 импульсов) [1]. Критерий 1 не выполнен для ПАЭ № 9 (незначительное превышение критериальных значений) и ПАЭ № 5, 8 (значительное превышение критериальных значений).

*Критерий 2:* изменение суммарной длительности импульсов, зарегистрированных в процессе нагружения, не должно превышать 2500 мкс на канал при повышении нагрузки на 10% от рабочей. Допустимое значение суммарной длительности АЭ-сигналов, накопленной при повторном нагружении каждым каналом, рассчитывается по формуле

$$\sum D_{\text{доп}} = \left[ \frac{(P_{\text{мах}} - P_{\text{сб}})}{0{,}1 \times P_{\text{раб}}} \right] \times 2500, \qquad (1)$$

где $\sum D_{\text{доп}}$ – допустимая суммарная длительность АЭ-сигналов, мкс; $P_{\text{мах}}$ – максимальное давление второго нагружения, МПа; $P_{\text{сб}}$ – минимальное давление второго нагружения (после сброса), МПа; $P_{\text{раб}}$ – рабочее давление, МПа.

$$\sum D_{\text{доп}} = \left[ \frac{(1{,}49 - 0{,}6)}{0{,}12} \right] \times 2500 = 18542 \text{ мкс}.$$

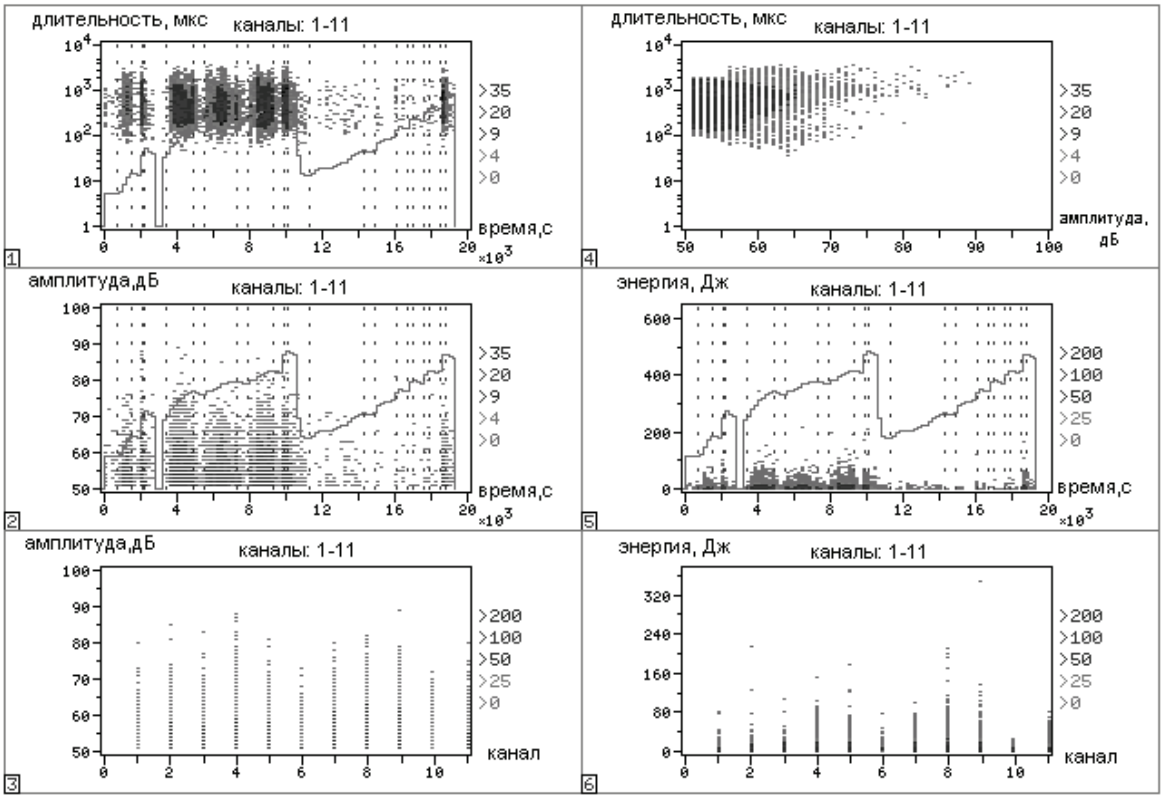



Рис. 3. Графики зависимостей основных параметров АЭ-сигналов аппарата: 1, 2, 4 – распределение длительности, амплитуды и энергии импульсов АЭ во времени; 5, 6 – распределение амплитуды и энергии АЭ-сигналов по каналам; 3 – корреляционная зависимость длительности импульсов от амплитуды (корреляция Капистрано)

*Критерий 3*: количество импульсов АЭ не должно превышать 60 импульсов на канал. Критерий 3 не выполнен для ПАЭ № 3, 7, 8, 9 [2, 3].

*Критерий 4***:** амплитуда всех импульсов не должна превышать 65 дБ. Критерий 4 не выполнен для ПАЭ № 2, 3, 4, 5, 8, 9, 11 [4].

*Критерий 5***:** скорость приращения суммарной энергии импульсов не должна расти с ростом нагрузки [1]. Оценка скорости приращения суммарной энергии импульсов АЭ проводится для каналов, зарегистрировавших более 10 импульсов. Критерий 5 не выполнен для ПАЭ № 2–11.

Таким образом, при повторном нагружении аппарата критерии оценки не выполнены для ПАЭ № 2–11. Оценочные критерии, приведенные в таблице, являются «критериями гарантированной приемки» объекта, и если при оценке состояния имеет место их нарушение, то производится дополнительный анализ данных и анализ интенсивности.

При анализе АЭ-данных аппарата были выявлены источники повышенной активности в области ПАЭ № 3, 5, 8 (класс А и В на повторном нагружении) [4–5]. Соотнесение расположения этих источников с разверткой аппарата показало, что они находится в области сварных швов № 1, 10 и пересечения сварных швов № 7, 8, 9 соответственно (рис. 2). По результатам предварительного анализа данных АЭ-контроля было рекомендовано провести следующий дополнительный контроль: капиллярную дефектоскопию сварного шва № 10 (изнутри); капиллярную дефектоскопию пересечения сварных швов № 7, 8, 9 (изнутри); ультразвуковую дефектоскопию пересечения сварных швов № 7, 8, 9.

До проведения АЭ-контроля была проведена капиллярная дефектоскопия сварного шва № 1 (изнутри). Дефектов не обнаружено. При проведении капиллярной дефектоскопии пересечения сварного

шва № 8 с № 7, 9 (изнутри) на сварном шве № 8 обнаружены дефекты длиной 30 мм. Дефекты были устранены, и произведена капиллярная дефектоскопия после ремонта сварного шва.

На сварном шве № 10 дефектов не обнаружено. При последующем гидроиспытании на прочность произошел пропуск в контрольное отверстие укрепляющего кольца тангенциального штуцера Ду 200. Был произведен ремонт сварного шва приварки тангенциального штуцера Ду 200 патрубка и укрепляющего кольца. Причина ремонта – сквозные дефекты в сварном шве приварки тангенциального штуцера Ду 200 к корпусу.

**Выводы**

Анализ данных АЭ-контроля аппарата показал, что обнаруженные методом ультразвукового контроля (УЗД) дефекты в сварном шве № 3 при гидроиспытании проявляют АЭ-активность, не характерную для развивающихся дефектов. Проведенный анализ интенсивности («не выше» класса А на повторном нагружении) [6, 7], анализ данных на выдержках, а также анализ локационной картины источников АЭ показал, что выявленные источники в зоне ПАЭ № 2, 4, 6, 7, 9–11 не являются развивающимися дефектами, имеют невысокую активность и должны быть отмечены для сравнения с результатами будущих испытаний. Полная обработка результатов АЭ-контроля и анализ данных аппарата подтвердила наличие источников повышенной АЭ-активности в зоне ПАЭ № 1, 2 (люк-лаза Ду 450). Последующий неразрушающий контроль подтвердил наличие дефектов в указанной зоне. Полученные результаты АЭ-контроля являются весьма весомыми для дальнейшей трактовки источников АЭ, для выполнения основных задач технического диагностирования в целом, а именно для контроля технического состояния объекта, поиска мест и определения причин отказа, прогнозирования технического состояния объекта.

На основании результатов описанных АЭ-испытаний также можно сделать более общие выводы.

- Сварные соединения обладают (по сравнению с основным металлом) большей неоднородностью, причем неоднородные участки более когерентны. Вследствие этого, несмотря на большую степень пластической деформации основного металла по сравнению со сварными швами, большую АЭ-активность показывают сварные соединения.
- Активность источников АЭ изменяется в процессе нагружения таким образом, что может поменяться показание наиболее опасного источника, при этом также изменяется класс источников и перераспределяется показание степени их опасности.

Приведенный пример иллюстрирует понятия полного сигнала АЭ и АЭ-образа объекта. В данном случае из АЭ-образа объекта выпали черты, связанные с пластической деформацией основного металла. Регистрировались только наиболее мощные импульсы от источников пластической деформации в сварных соединениях. Сигналы от пластической деформации основного металла могли также оказаться ниже порогового уровня. Таким образом, перед оператором, проводящим контроль, всегда стоит задача: по искаженному АЭ-образу объекта составить представление о напряженно-деформированном состоянии (НДС) этого объекта. Важным положением является то, что отсутствие АЭ-сигнала (но не пропуск сигнала) несет информацию о состоянии объекта и поэтому является элементом его образа.

**Литература**

1. ПБ 03-593-03. Правила организации и проведения акустико-эмиссионного контроля сосудов, аппаратов, котлов и технологических трубопроводов. – Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 09.06.03 г. – № 77.
2. Машиностроение: Энциклопедия. Т. III-7: Измерения, контроль, испытания и диагностика / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, В.Н. Филинов и др. – М.: Машиностроение, 1997. – 460 с.
3. Юдин А.А., Иванов В.И. Связь сигнала акустической эмиссии с пластической деформацией металла // Проблемы прочности. – 1986. – № 6. – С. 103–105.
4. Неразрушающий контроль. Справочник в 8 томах. – Т. 7. – Кн. 1. Метод акустической эмиссии / В.И. Иванов, И.Э. Власов. – М.: Машиностроение. – 2006. –181 с.
5. Иванов В.И., Быков С.П. Классификация источников акустической эмиссии // Диагностика и прогнозирование разрушения сварных конструкций. – 1985. – № 1. – С. 67–74.
6. ГОСТ 27655-88. Акустическая эмиссия. Термины, определения и обозначения. – Введ. 01.01.1989. – М.: Госстандарт, 1989. – 14 с.
7. МР 38.18.015-94. Методические рекомендации по акустико-эмиссионному контролю сосудов, работающих под давлением, и трубопроводов нефтехимических производств. Согласованы с Госгортехнадзором РФ 06.06.94 г.

***Лузина Наталья Петровна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, bagiran@mail.ru

# 6 КОМПЬЮТЕРНЫЕ СИСТЕМЫ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**УДК 681.3.069, 681.324**

## ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ДИНАМИКИ МОРСКИХ ОБЪЕКТОВ В ШИРОКОЭКРАННЫХ СИСТЕМАХ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ

**А.А. Безгодов, А.С. Загарских, А.В. Бухановский**

Рассматриваются особенности компьютерного моделирования и интерактивной визуализации динамики морских объектов на нерегулярном волнении для задач исследовательского проектирования в судостроении применительно к широкоэкранной системе виртуальной реальности СПбГУ ИТМО.

**Ключевые слова:** интерактивная визуализация, стереоизображение, сетки, привязанные к камере, морфологическое сглаживание.

### Введение

Современный уровень высокопроизводительных технологий компьютерного моделирования характеризуется стремительным ростом объемов расчетных данных, что затрудняет их практическую интерпретацию и анализ. Несмотря на то, что отдельные предметные области допускают применение формальных методов, эффективно снижающих размерность исходных данных, основным подходом к отображению результатов моделирования сложных объектов и систем является научная визуализация, обеспечивающая «погружение» исследователя в моделируемое явление с возможностью всестороннего наблюдения и анализа воспроизводимых закономерностей реального мира. Эффект «погружения» может быть усилен за счет применения интерактивных технологий, отображающих реакцию моделируемого объекта на разнообразные внешние воздействия, инициируемые пользователем. Такой подход, получивший название виртуальной реальности (ВР), развивается в тесной связке с вычислительными технологиями компьютерного моделирования и служит основой для создания современных систем поддержки принятия решений в области проектирования сложных технических систем и комплексов, в частности – морских судов и объектов океанотехники [1].

Специфика исследовательского проектирования морских объектов состоит в неопределенности и неполноте информации об их поведении в экстремальных ситуациях, совокупно вызванных воздействием внешней среды, инициируемых им опасных ситуаций (например, интенсивным обледенением) и внутренних дестабилизирующих факторов (смещения груза, затопления отсеков и пр.). При этом развитие аварийной ситуации происходит по различным сценариям, которые не могут быть в общем случае сведены к ограниченному набору типовых случаев. Поскольку натурные испытания для их изучения не представляются возможными, а физический эксперимент в опытовом бассейне экономически не оправдан на этапе исследовательского проектирования, основным инструментом поддержки принятия решений становятся численные модели динамики морских объектов [2], позволяющие количественно воспроизвести их поведение под воздействием реалистичных внешних возмущений. Это, в свою очередь, открывает определенные перспективы для применения технологий ВР.

В работе рассматриваются особенности компьютерного моделирования и интерактивной визуализации динамики морских объектов для задач исследовательского проектирования в судостроении применительно к системе ВР Центра ситуационного моделирования и визуализации (ЦСМВ) СПбГУ ИТМО. Система имеет недеполяризующий стерео-экран обратной проекции размером 3,35×2,0 м, изображение на котором формируется посредством шести HDTV DLP-проекторов Roxar Projectiondesign, управляемых специализированной системой обработки стереоизображения. Собственно создание и подготовка изображения выполняются на рабочей станции HP Z800, оснащенной видеокартой nVidia Quadro FX 5800. Интерактивное взаимодействие с наблюдателем в системе ВР обеспечивается с помощью манипулятора с шестью степенями свободы производства 3dConnexion серии Space Pilot. Допускается использование купольных поворотных камер AXIS AX0245 для отслеживания перемещения наблюдателя относительно моделируемого объекта.

### Метод моделирования динамики морского объекта на нерегулярном волнении

Реалистичная визуализация в реальном времени требует применения адаптированных моделей и методов компьютерного моделирования динамики морских объектов, ориентированных на воспроизведение основных качественных эффектов с разумным уровнем точности для широкого диапазона условий эксплуатации. Поскольку структура традиционных моделей в форме идеализированных уравнений движения [3] существенно различается для воспроизведения разных экстремальных ситуаций (что ограничивает области их применения), в работе использован прямой метод, основанный на вычислении главных сил и моментов непосредственным интегрированием по мгновенной погруженной поверхности корпуса объекта $S$:

$$\mathbf{F} = -\left[\iint\limits_S p\mathbf{n}dS\right] - \left[\iint\limits_S \boldsymbol{\eta}dS\right] + \mathbf{D}, \tag{1}$$

$$\mathbf{M} = -\left[\iint\limits_S (p\mathbf{n})\times(\mathbf{r}-\mathbf{p})dS\right] - \left[\iint\limits_S \boldsymbol{\eta}\times(\mathbf{r}-\mathbf{p})dS\right], \tag{2}$$

где **D** – весовое водоизмещение объекта; $p$ – давление воды в точке; **n** – нормаль к поверхности; **r** – радиус-вектор точки поверхности в глобальных координатах; **p** – положение объекта в пространстве, определяемое шестью степенями свободы; **η** – демпфирующая сила, действующая на единицу поверхности корпуса объекта. В первом приближении демпфирующую силу допустимо рассматривать пропорциональной скорости **v** перемещения корпуса судна и модуля косинуса угла между нормалью и направлением потока; коэффициент пропорциональности определяется экспериментально по записям затухающих колебаний.

В каждый момент времени $t$ граница погруженной поверхности $S(t)$ определяется исходя из мгновенного профиля взволнованной поверхности моря, задаваемой моделью Лонге-Хиггинса [4], идентифицируемой по частотно-направленному спектру волнения $E(u,v)$, где $u,v$ – волновые числа. Несмотря на относительно слабую сходимость модели, ее достоинством является возможность наглядной гидродинамической интерпретации с точки зрения определения волновых давлений в терминах вертикальных смещений $\Delta z$ частиц жидкости на глубине $z_0$:

$$p(t,x,y,z_0) = \left[\Delta z(t,x,y,z_0) - z_0\right]\rho g, \tag{3}$$

где

$$\Delta z(x,y,z,t) = \sum_i \sum_j e^{\sqrt{u^2+v^2}z} a_{ij} \cos(u_i x + v_j y - \omega(u_i,v_j)t + \varphi_{ij}). \tag{4}$$

Здесь $a_{ij}$ – коэффициенты модели Лонге-Хиггинса; $\varphi_{ij}$ – равномерно распределенные случайные фазы; $\omega = \omega(u,v)$ – дисперсионное соотношение для волн малой амплитуды, $\rho$ – плотность воды.

Аналитическое вычисление значений (1)–(2) при заданных характеристиках входных воздействий (3)–(4) возможно только для модельной формы корпуса, например, задаваемой эллипсоидом вращения. В общем случае при произвольной геометрии морского объекта соответствующие интегралы рассчитываются численно по квадратурным формулам типа Маркова с локально распределенными случайными узлами, перестраиваемыми на каждом шаге $t$.

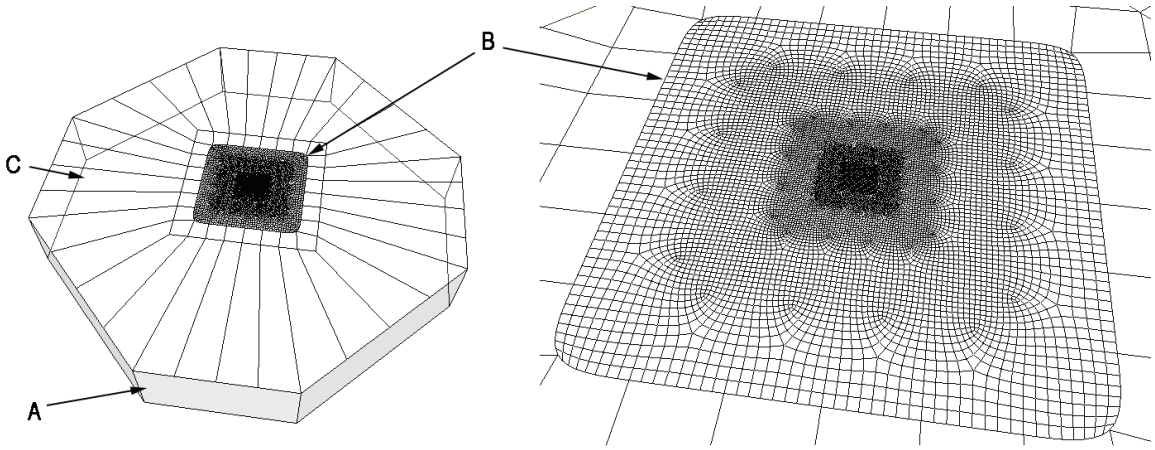
Значения главных сил (1) и моментов (2) в каждый момент времени $t$ позволяют определить скорости и перемещения произвольной точки корпуса объекта. При этом модель (1–4) является достаточно удобной для целей интерактивной визуализации: она позволяет в реальном времени с достаточной точностью воспроизводить динамику морских объектов с учетом всех шести степеней свободы. Дополнительно, выражения (1)–(2) достаточно легко модифицируются путем добавления сил и моментов, вызванных как внешними воздействиями (ветровой шквал, удар разрушающейся волны и пр.), так и динамическими аспектами (перекладка руля, работа движителя). Как следствие, это позволяет придать задаче управления процессом визуализации в рамках (1)–(2) ясную физическую интерпретацию: нестационарные изменения режимов движения объекта (например, поворот на заданный курс) осуществляются путем приложения виртуальных сил, направление и интенсивность которых задается наблюдателем посредством манипулятора системы ВР.

### Технология визуализации взволнованной поверхности моря

Технологии визуализации движения самого объекта в соответствии с заданной траекторией **p**($t$) в настоящее время достаточно хорошо проработаны и не нуждаются в детальном обсуждении. Однако для создания эффекта «погружения» в системе ВР необходимо дополнительно отображать визуально бесконечную водную поверхность, простирающуюся от точки наблюдения до горизонта. С этой целью была применена технология неравномерных сеток, привязанных к камере [5]. Она позволяет компоновать сеточную область из трех частей (рис. 1).

Область А (дно) используется для маркировки буфера трафарета при отображении раздела сред, область В (так называемая область интенсивного волнения) применяется для отображения собственно волн в соответствии с моделью (4), а область С (область горизонта) находится достаточно далеко от наблюдателя; в ней видимой высотой волн в процессе визуализации можно пренебречь. В процессе визуализации центр такой сетки всегда находится под или над камерой. Поворот камеры на ориентацию сетки в пространстве не влияет. Вертикальная координата вершин в области В модифицируется вершинным шейдером в соответствии с расчетными значениями по (3). При этом высота волн плавно уменьшается по мере увеличения расстояния от наблюдателя. Таблица предрассчитанных ординат взволнованной поверхности передается в вершинный шейдер как трехмерная текстура. Дополнительно при закрашивании водной поверхности учитывается частичное отражение Френеля (только небо, рис. 2, В), и частичное

преломление с затуханием по глубине (рис. 2, C). В рамках используемой технологии визуализации камера может находиться не только над водой, но и под водой, а также на границе сред. Для корректного отображения границы сред при визуализации морской поверхности применяется эффект затуманивания, рис. 2, A.




а б

Рис. 1. Сетка для отображения морской поверхности: общая структура сетки (а), сетка области интенсивного волнения (б); A – дно; B – область интенсивного волнения; C – область горизонта

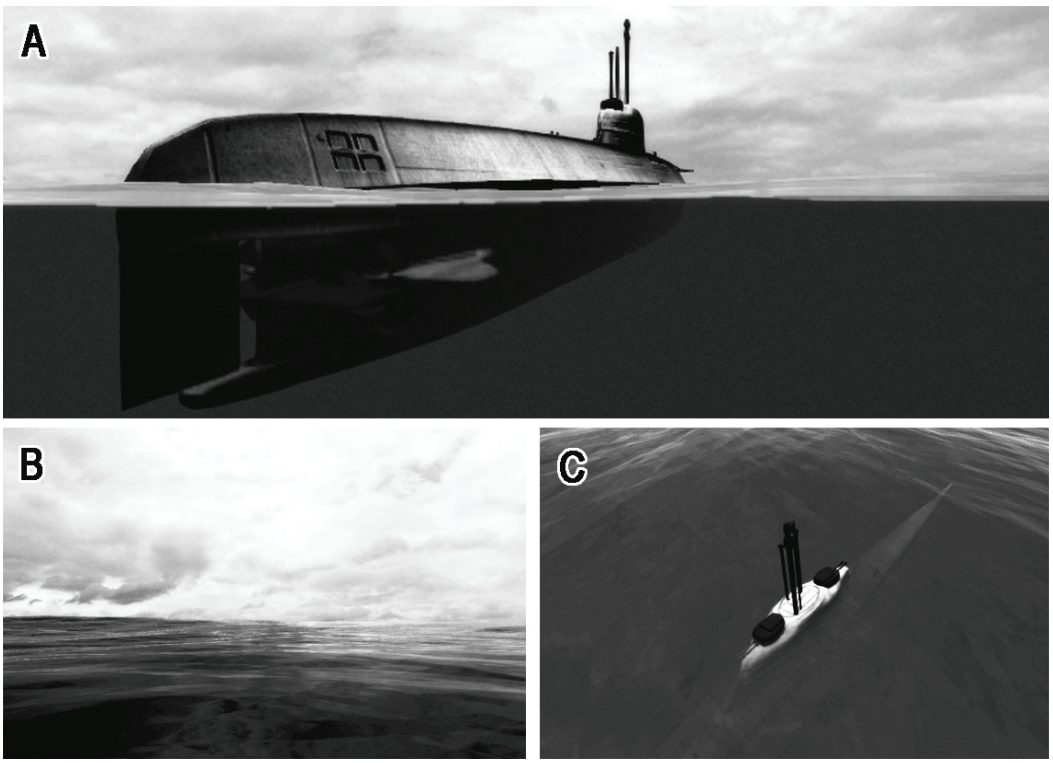



Рис. 2. Эффекты визуализации водной поверхности: раздел сред (A); отражение Френеля (B); затухание по глубине (C)

Дополнительным аспектом отображения визуальных свойств водной поверхности является воспроизведение расходящихся корабельных волн при движении плавучего морского объекта. Поскольку нелинейная задача расчета корабельных волн в полной постановке является существенно более ресурсоемкой по сравнению с моделью (1)–(4), для создания визуального эффекта используется упрощенная модель, основанная на решении линейного уравнения колебаний на регулярной сетке. Начальное возмущение формируется в точке первого (по курсу) пересечения корпуса объекта и водной поверхности. Результат решения уравнения как набор значений в текстуре передается в вершинный шейдер, и высота колебаний добавляется к высоте волн. В тех областях, где скорость частиц колеблющейся поверхности выше определенного значения, поверхность моря окрашивается в белый цвет, что создает визуальный эффект пенообразования.

**Адаптация технологии визуализации для широкоэкранной системы виртуальной реальности**

Технология визуализации динамики морского объекта с обеспечением эффекта «погружения» реализована в форме программной системы на языке Microsoft Visual C++. В качестве графического API используется OpenGL 3.3. Для компиляции шейдеров применяется библиотека nVidia Cg Compiler. Данная система не предъявляет существенных требований к аппаратному обеспечению визуализации и может использоваться даже на обычной рабочей станции с соответствующей видеокартой. Однако ее адаптация к особенностям системы ВР дает возможность поддерживать синтез стереоизображения с использованием расширения GL_EXT_quad_buffer. В данном случае используются четыре экранных буфера: Back Left, Back Right, Front Left, Front Right, что, в свою очередь, позволяет выбирать правый или левый буфер экрана с целью создания раздельного изображения для восприятия левым и правым глазом наблюдателя (с применением соответствующих очков).

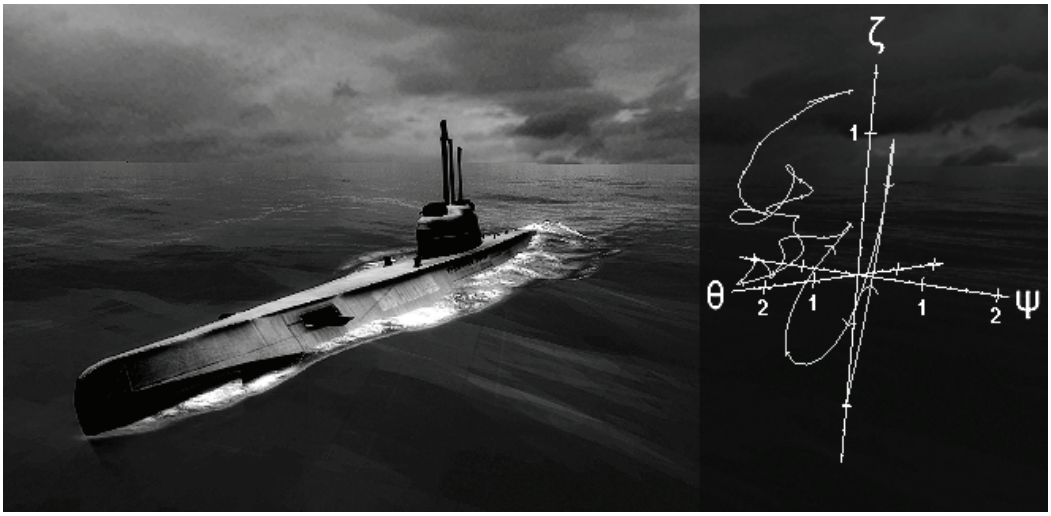



Рис. 3. Исследование режимов качки морского объекта (с отображением трехмерной фазовой диаграммы крен–дифферент–возвышение центра тяжести)

В широкоэкранных системах ВР остро встает проблема «ступенчатости» изображений, которая обусловлена конечным размером пикселя. Например, для экрана системы ВР ЦСМВ СПбГУ ИТМО размер пикселя при разрешении 1920×1080 будет составлять около 2 мм, что визуально ощутимо на небольшом расстоянии от экрана. Чтобы избавиться от этого эффекта и сделать изображение более реалистичным, применен метод морфологического сглаживания (Morphological Antialiasing, MLAA) [6]. Данный метод заключается в нахождении *L*-образных форм на ступенчатых разрывах непрерывностей в изображении и их размытии. Его можно условно разделить на три этапа. На первом этапе находятся все разрывы непрерывностей в изображении, на втором этапе рассчитывается длина найденных непрерывностей (что необходимо для расчета уровня сглаживания пикселей), а на третьем этапе происходит собственно поиск всех *L*-образных форм и их сглаживание.

Особенностью применения технологий ВР для решения задач исследовательского проектирования является возможность одновременного наблюдения динамической сцены и характеризующих ее физических и математических абстракций в форме диаграмм и графиков. В широкоэкранной системе ВР допустимо формировать эти графики непосредственно в основной рабочей области экрана; для этого может использоваться отдельная группа проекторов. На рис. 3 в качестве примера приведен образ экрана с одновременным отображением трехмерной фазовой диаграммы крен–дифферент–возвышение центра тяжести, привязанной к локальной системе координат.

**Заключение**

Разработанная технология интерактивной визуализации и программное решение на ее основе обеспечивают достаточно реалистичное воспроизведение динамики морских объектов в системе ВР ЦСМВ СПбГУ ИТМО. При этом эффект «присутствия» не ограничивается только визуальным восприятием: при позиционировании камеры на корпусе судна при интенсивной качке наблюдатель ощущает ухудшение обитаемости (эффект «морской болезни»).

Работа выполнена при поддержке проектов «Интеллектуальная система навигации и управления морским динамическим объектом в экстремальных условиях эксплуатации», «Интеллектуальные технологии поддержки процессов исследовательского проектирования судов и технических средств освоения океана» и «Высокопроизводительный программный комплекс моделирования динамики корабля в экстремальных условиях эксплуатации» ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2007–2013 годы.

Разработанная система применяется в рамках проекта по реализации постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

**Литература**


1. Интеллектуальные системы в морских исследованиях и технологиях / Под ред. Ю.И. Нечаева. – СПб: ГМТУ, 2001. – 352 с.
2. Бухановский А.В., Иванов С.В., Нечаев Ю.И. Виртуальное моделирование динамики судна на морском волнении в интеллектуальных тренажерах // Искусственный интеллект. – 2004. – Вып. 3. – С. 350–359.
3. Fonseca N., Guedes Soares C. Comparison of numerical and experimental results of nonlinear wave-induced vertical ship motions and loads // Journal of Marine Science and Technology. – 2002. – V.6. – № 4 – P. 193–204.
4. Лонге-Хиггинс М.С. Статистический анализ случайной движущейся поверхности // В кн.: Ветровые волны. – М.: Издательство иностранной литературы, 1962. – С. 112–230.
5. Mittring M. «Finding Next Gen – CryEngine 2» / in book: Advanced Real-Time Rendering in 3D Graphics and Games Course // ACM SIGGRAPH – 2007 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://portal.acm.org/citation.cfm?id=1281671], своб.
6. Reshetov A. Morphological Antialiasing // Proc. of High Performace Graphics. – 2009 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: – [http://visual-computing.intel-research.net/publications/papers/2009/mlaa/mlaa.pdf], своб.



***Безгодов Алексей Алексеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, НИИ НКТ, аспирант, demiurghg@gmail.com

***Загарских Александр Сергеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, alazar.az@gmail.com

***Бухановский Александр Валерьевич*** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, НИИ НКТ, доктор технических наук, директор, avb_mail@mail.ru


**УДК 621.397.13:519.95**

# ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ АЛГОРИТМЫ КОДИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Е.И. Колесников, Е.В. Костикова**

Рассмотрен подход к решению задач представления и обработки изображений на основе рекурсивного поиска опорных точек при сжатии и использовании двумерной интерполяции при восстановлении изображений. Приведен пример алгоритма поиска опорных точек.

**Ключевые слова:** рекурсия, опорные точки, полигон, полигональная сетка.

## Введение

Дефицит пропускной способности каналов связи всегда имеет место, и развитие техники связи показывает, что это «вечная» проблема всей техники связи, и, особенно, телевизионной техники. В связи с этим во всех системах обработки изображений применяются устройства сжатия, реализующие максимально возможные способы распараллеливания алгоритмов кодирования. Одним из многочисленных методов сжатия, реализующим кодирование изображения без перехода в спектральную область, является полигонально-рекурсивный метод (ПРМ) кодирования, основанный на пространственно-рекурсивном разбиении исходного изображения [1−4].

Сегодня активно развиваются подходы по способам представления видеоинформации на основе пирамидально-рекурсивных структур данных [2]. Такие структуры обеспечивают возможность эффективной обработки видеоданных с поэтапной выборкой и передачей нужной в данное время информации. Также, благодаря высокой степени компрессии данных этого метода, в таком представлении могут храниться очень большие базы видеоданных.

Основные достоинства данного подхода заключаются в следующем:

- в процессе кодирования изображений решается задача компактного представления исходных данных с помощью набора опорных точек (ОТ), где каждая точка максимально характеризует свою локальную область (задача сжатия);
- полигонально-рекурсивный метод разбиения исходного изображения на полигоны позволяет максимально распараллеливать процесс поиска ОТ, что является важным при сжатии нестационарных изображений.

Основной идеей этого метода является аппроксимация сигнала изображения набором областей с интенсивностью, изменяющейся внутри каждой области по известному закону (с применением сплайнов различного порядка, обычно – от нулевого до третьего) [3, 4]. В отличие от простейшего способа интерполяции изображения по набору регулярно расположенных отсчетов, полигональный метод использует нерегулярный массив отсчетов, связанных с некоторыми «особыми» точками исходного изображения, которые становятся опорными при его восстановлении. Выделение на реальных изображениях, содержащих, кроме полезного сигнала, различные помехи, «особых» точек характеризует ПРМ как попытку выделения полезной информации из шумовой, а сам алгоритм регулярной триангуляции может быть охарактеризован как оптимальный инструмент восстановления изображений по опорным точкам [5−7].

Целью работы является исследование алгоритмов ПРМ разбиения на полигоны при поиске ОТ на этапе кодирования изображений и применении интерполяционных алгоритмов на этапе декодирования. При этом решается задача определения оптимальных параметров системы кодирования на основе предложенного метода (число полигонов, число опорных точек, число бит на отсчет и т.д.) и выбора наилучшей структуры представления ОТ.

### Описание метода кодирования

Процесс кодирования и декодирования сигналов изображений на основе ПРМ заключается в следующем (рис. 1). На этапе кодирования, изображение рассматривается как единая область (полигон), и на ней проверяется критерий однородности (наличие или отсутствие каких-либо объектов или опорных точек). На этапе кодирования задается порог отклонения значений отсчетов от дисперсии сигнала, далее сравниваются отсчеты исходного полигона с порогом для разбиения и дальнейшего поиска ОТ. В пределах каждого из полученных полигонов осуществляется поиск оптимальной точки, максимально характеризующей двумерную поверхность полигона. В результате анализа всего изображения получаем полигональную двумерную сетку, содержащую как пустые полигоны (однородные), так и полигоны, содержащие ОТ.

На этапе декодирования (восстановления) каждая ОТ соединяется с ближайшими соседними точками, и в итоге все точки будут соединены сеткой, вершины которой в результате двумерной интерполяции позволяют построить регулярную триангуляцию.

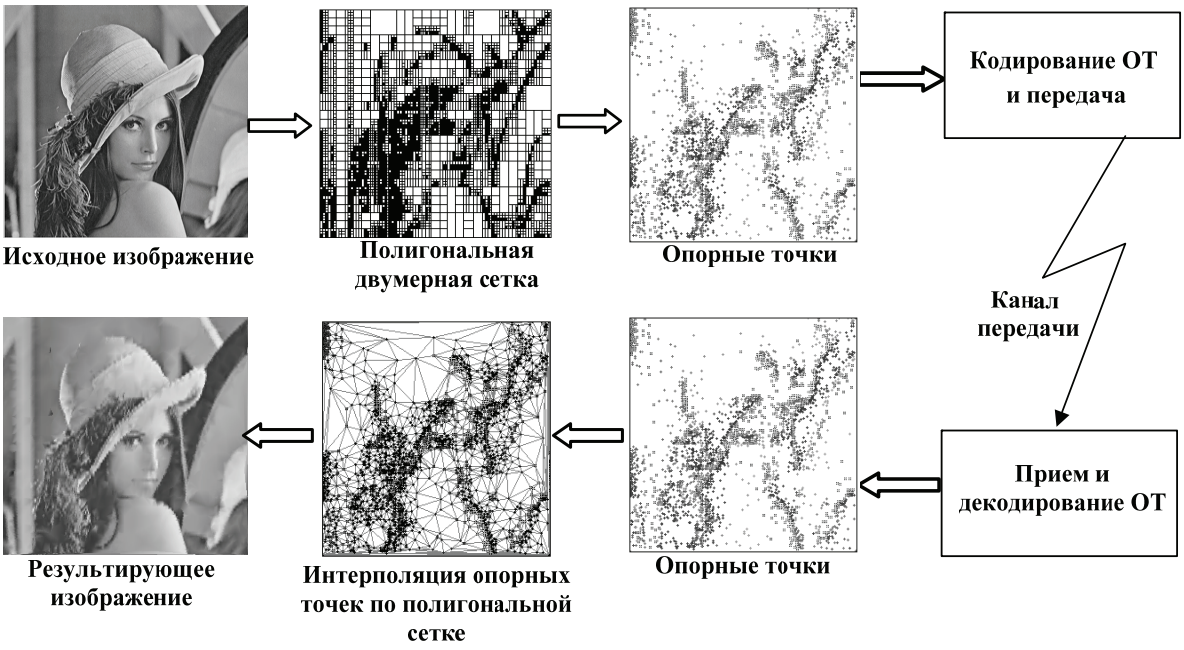



Рис. 1. Обобщенный полигонально-рекурсивный метод кодирования и декодирования изображений

Простым подходом решения задачи выделения ОТ является использование одного из способов разбиения на основе шаблонов [8]. В этом случае в качестве области для построения первичной сетки выбирают одну из подходящих геометрических форм, для которых разработаны шаблоны (разумеется, эта область должна полностью включать в себя заданную). Рассмотрим вариант построения первичной сетки методом деления на три полигона с использованием полигонально-рекурсивного подхода при поиске опорных точек на этапе кодирования и интерполяции этих точек по полигональной сетке на этапе декодирования изображений. Заметим, что для случая равновероятного распределения ОТ на исходном изображении построенная при разбиении сетка получается близкой к равномерной, т.е. линейные размеры полигонов приблизительно равны. Это обусловлено, во-первых, тем, что поиск ОТ осуществляется по

амплитудным (яркостным) свойствам сигнала, а, во-вторых, тем, что при построении первичной сетки не используется никакой информации о геометрии заданной области, т.е. свойствах конкретной реализации сигнала. При таком представлении изображение разбивается на равные непересекающиеся полигоны (рис. 2, а). Затем процедура повторяется для каждого полигона до тех пор, пока дисперсия значений яркостей отсчетов превышает заданный порог. В результате каждому полигону приписывается численное значение, называемое яркостью или цветом и являющееся его обобщенной характеристикой. Разбиение изображений, не являющихся тривиальными, представляет собой одну из самых сложных задач обработки изображений. Конечный успех анализа изображений во многом определяется точностью разбиения и правильным выбором основных параметров – числа и формы разбиения.

Таким образом, опорные точки − это вершины троичного дерева полученной полигональной сетки (рис. 2, б), с помощью аппроксимации которых можно обеспечить эффективное кодирование при заданном качестве. Опорные точки могут быть найдены двумя способами: а) фиксацией координат по достижении требуемой точности в процессе разбиения; б) поиском ОТ в пределах полигона**.**

Вопросы, связанные с критериями и алгоритмами поиска ОТ в пределах полигона, в работе не рассматриваются.

### Разработка структуры видеоданных

Разработка эффективной структуры данных для хранения и передачи опорных точек осуществлена с использованием динамического одномерного массива, сгруппированного по таким признакам, как число полигонов и уровней разбиений. Данная структура позволяет постепенно воссоздать результирующее изображение по мере приема массива сжатого описания опорных точек. При этом каждая ОТ характеризуется своими абсолютными координатами и яркостью в пределах полигона, что учтено при формировании сжатого описания [9].

Для формирования сжатого описания изображения по ОТ используется динамический одномерный массив (рис. 2, в), сгруппированный в зависимости от числа полигонов после разбиения (при разбиении на два полигона группы содержат два элемента, при разбиении на три полигона группы содержат соответственно три элемента, и т.д.).

В каждой группе 1-й элемент указывает на предыдущий уровень разбиения, остальные элементы содержат следующие признаки:

$Пр_1$ – признак того, что полигон подлежит следующему дроблению, т.е. покрывается более одной ОТ.

$Пр_2$ – признак того, что полигон далее не подлежит дроблению и покрывает одну ОТ. В этом случае в сжатое описание дополнительно заносятся координаты ОТ в пределах полигона;

$Пр_3$ – признак того, что полигон не содержит ни одной ОТ и, следовательно, не подлежит последующему дроблению.

По окончании процесса разбиения и поиска ОТ на этапе кодирования полученный динамический массив преобразуется в двоичный код (массив битов), который далее подвергается энтропийному кодированию для передачи по каналу данных.

Существует множество различных способов создания конечно-элементных сеток. Эти способы классифицируются как по алгоритму полигонального разбиения (различные формы полигонов), так и по способу поиска опорных точек в пределах одного полигона [8]. Для построения дискретной модели двумерной области в основном могут использоваться два семейства элементов: треугольники и четырехугольники. Стороны линейных элементов каждого семейства представляют собой прямые линии. Квадратичные и кубические элементы могут иметь прямолинейные и/или криволинейные стороны. Это означает, что оптимальное разбиение изображения на области требует достаточно большой вычислительной сложности алгоритма, реализующего триангуляционный метод кодирования.

Экспериментальные исследования показали, что при хорошем субъективном качестве восстановленных изображений коэффициент сжатия с использованием различных алгоритмов разбиения и поиска опорных точек на основе ПРМ имеет следующие особенности.

- Различные алгоритмы разбиения изображений приводят к различному приближению к энтропии изображения. Вместе с тем требуемая пропускная способность канала зависит от числа полигонов при разбиении. Результаты моделирования алгоритмов разбиения и восстановления изображений показали, что наиболее близкий к энтропии источника результат достигается при трихотомии, при этом на практике оптимальное основание кода составляет иррациональное число *e*.
- Коэффициент сжатия, который зависит от числа опорных точек, при трихотомии приблизительно в 1,2 раза больше, чем при дихотомии, и в 1,4 раза больше, чем при тетрахотомии.

При равновероятном распределении опорных точек на исходном изображении эффективное сжатие достигается, когда число опорных точек составляет 20–30% от общего числа точек, при этом количество бит, необходимое для кодирования ОТ, не превышает 6 бит.

Исследования проводились над изображениями в 256-уровневом представлении яркости в формате 8 бит на пиксель. При этом емкость памяти для хранения цифрового изображения равна $256^2$ байт. Алгоритмы кодирования и декодирования реализованы на языке высокого уровня C++.

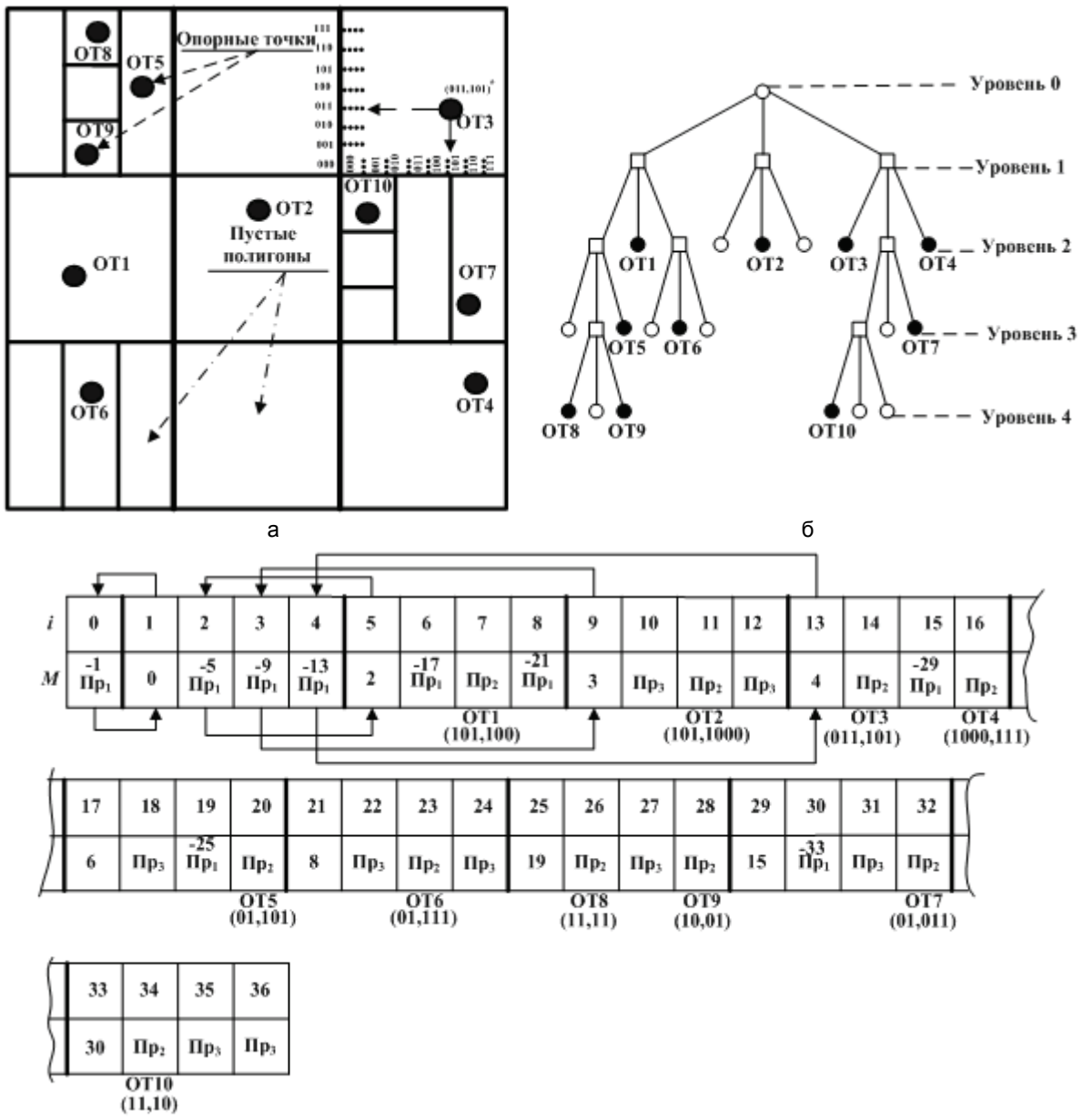



Рис. 2. Структура данных опорных точек: (а) – двумерная пирамида изображения; (б) – соответствующая ей структура данных; (в) – массив сжатого описания исходного изображения

**Заключение**

Сформулируем основные выводы, которые являются также основными свойствами предлагаемого метода при проектировании систем кодирования и декодирования нестационарных изображений.

1. Структура данных представляется в виде некоторой регулярной, иерархической, не зависящей от содержания данных структуры. Эта структура содержит множества опорных точек и их взаимосвязь.
2. Разработка алгоритмов производится таким образом, чтобы обеспечить возможность поэтапного приближения к эпсилон-энтропии исходного сигнала. Для этого на каждом уровне разбиения исходного изображения анализируется результат восстановления по величине ошибки кодирования и при необходимости производится дальнейшее разбиение и уточнение результирующего изображения.
3. Элементы сжатого описания представляют собой не элементы изображения или информационного поля, а опорные точки, имеющие похожие или одинаковые свойства. Таким образом, сложность ПРМ определяется не разрешающей способностью аппаратуры (количеством отсчетов изображения), а количеством опорных точек, т.е. числом элементов самой структуры, которая для конкретного класса может быть значительно меньше числа отсчетов исходного изображения.

**Литература**

1. Твердотельная революция в телевидении / В.В. Березин, А.А. Умбиталиев, Ш.С. Фахми, А.К. Цыцулин, Н.Н. Шипилов. – М.: Радио и связь, 2006. – 300 с.
2. Александров В.В., Горский И.Д. Представление и обработка изображений. Рекурсивный подход. – Л.: Наука, 1985. – 192 с.
3. Demaret L., Iske A. Adaptive image approximation by linear splines over locally optimal Delaunay triangulations // IEEE Signal Processing Letters. – 2006. – № 13 (5). – P. 281–284.
4. Demaret L., Dyn N. and A. Iske. Image compression by linear splines over adaptive triangulations // Signal Processing. – 2006. – № 86 (7). – P. 1604–1616.
5. Demaret L., Iske A. Anisotropic triangulation methods in image approximation. In: Approximation Algorithms for Complex Systems. E.H. Georgoulis, A. Iske and J. Levesley (etc). – Berlin: Springer, 2010. – P. 47–68.
6. Фахми Ш.С. Кодирование и декодирование видеоинформации // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2007. – Вып. 2. – С. 43–51.
7. Прапарата Ф., Шеймос М. Вычислительная геометрия: Введение. – М.: Мир, 1989. – 478 с.
8. Фахми Ш.С. Полигональная рекурсивная обработка видеоинформации // Вопросы радиоэлектроники. Сер. Техника телевидения. – 2008. – Вып. 1. – С. 42–51.
9. Фахми Ш.С. Аналитическая модель оценки степени приближения к эпсилон-энтропии на основе пирамидально-рекурсивного метода кодирования изображений // Вестник ТОГУ. – 2010. – № 1 (16). – С. 32–44.

***Колесников Евгений Игоревич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, evgeniy777.84@gmail.com

***Костикова Елена Валентиновна*** – Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций, преподаватель, Kostikovaev@mail.ru

**УДК 004.627**

# ИССЛЕДОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РЕАЛИЗАЦИИ ЭТАПА ПРЕДСКАЗАНИЯ ЛИФТИНГОВОЙ СХЕМЫ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ СЖАТИЯ ЗВУКА

**Е.В. Пиуновский**

Проведено сравнение различных реализаций этапа предсказания лифтинговой схемы вейвлет-преобразования на основе трех различных функций: Хаара, линейной и полиномиальной. В качестве анализируемых данных выбраны аудиосигнал и финансовый временной ряд. Представлены лифтинговая схема и краткое описание ее основных этапов. Выполнен анализ результатов различных вариантов предсказания и приведена их количественная оценка. Сделаны выводы о влиянии сложности функции на результат предсказания различных типов сигналов.

**Ключевые слова:** лифтинг, лифтинговая схема, этап предсказания, вейвлет, сжатие звука, аудиосигнал.

## Введение

В настоящее время работа с мультимедийной информацией, подлежащей передаче по телекоммуникационным сетям, является активно развивающейся областью цифровой обработки сигналов [1]. Одно из важнейших мест в указанной области часто отводят задаче сжатия аудиоданных, которые могут как являться составной частью передаваемого видеотрафика, так и представлять собой отдельный цифровой поток. Для успешного решения данной задачи требуется применение новых технологий, одной из которых является вейвлет-преобразование (ВП), изучавшееся многими исследователями в последние годы. Рассмотрение различных источников позволяет предположить, что в настоящий момент наиболее перспективным методом построения вейвлет-функций является лифтинговая схема [2–4].

Для исследования возможности применения лифтинговой схемы ВП при решении задачи сжатия звука необходимо практическое рассмотрение различных вариантов реализации ее основного этапа, называемого этапом предсказания. Для выбора предпочтительного варианта из рассмотренных требуется как краткое описание технологий, используемых в каждой реализации этапа предсказания, так и графическое или числовое сравнение практических результатов.

На данный момент существуют примеры подобных исследований, проведенных на основе алгоритмов, реализация которых наиболее подробно описана в источнике [4]. Но, с точки зрения автора, сделанные в них выводы нельзя считать общими, так как соответствующие опыты проводились над ограниченными наборами данных определенного типа. В работе рассматриваются два различных вида исходного сигнала, а также функции различной сложности, что позволяет не просто проанализировать полученные результаты, но и осуществить их сравнение.

### Постановка задачи

Лифтинговая схема использует подобие низкочастотных и высокочастотных компонент, что позволяет резко ускорить преобразование и снизить количество используемых в схеме операций, обеспечивает простой и интуитивно понятный алгоритм обратного преобразования, а также дает некоторые другие преимущества [2, 3]. Лифтинг может быть представлен в виде трех основных этапов (рис. 1).

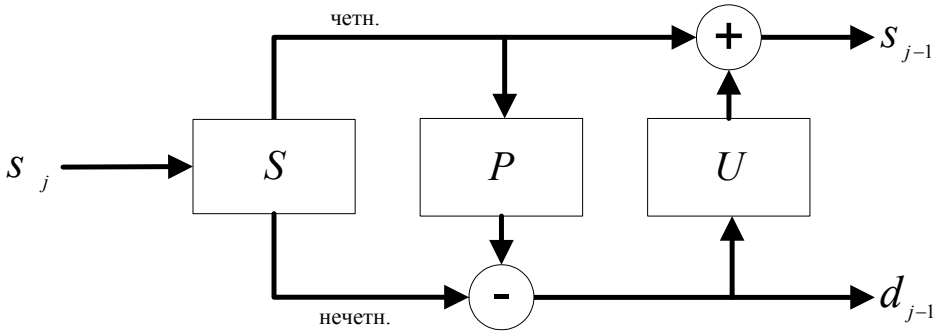



Рис. 1. Лифтинговая схема ВП

На первом из них осуществляется разбиение (*S*, split) сигнала по одному из правил, например, на четные и нечетные отсчеты (вейвлет Лэйзи) или на полусуммы и полуразности (вейвлет Хаара). Далее происходит предсказание (*P*, prediction) неизвестных отсчетов и разница между предсказанным и исходным значениями присваивается вейвлет-коэффициенту. На последнем этапе происходит обновление (*U*, update) оставленных отсчетов с помощью соседних вейвлет-коэффициентов, которое позволяет сохранить среднее, осуществить сглаживание (smoothing) функции. В результате получаем грубое представление исходного сигнала (*s*) следующего уровня разложения ($j$–1) и набор детальной информации (*d*) [3].

Второй этап (этап предсказания) является основным и оказывает наибольшее влияние на результаты применения построенной лифтинговой схемы для решения поставленных задач. При его реализации можно выделить и исследовать следующие три вида функций предсказания [5]:

1. функцию (вейвлет) Хаара;
2. линейную функцию;
3. полиномиальную функцию.

Реализация алгоритмов данных функций и исследование возможностей предсказания с их помощью на отрезке аудиосигнала позволяют выделить лучший вариант исполнения этапа предсказания для звука. Сравнение полученных результатов с опытом предсказания сигнала другого вида помогает показать особенности звука, которые упрощают (или, наоборот, усложняют) процесс предсказания. В связи с этим в работе осуществлялось последовательное применение функций различной сложности к наборам данных двух типов – звукового сигнала и финансового временно́го ряда (т.е. колебания курса валют или биржевых котировок).

### Описание исследования

Как было указано выше, для исследования были выбраны два типа сигналов, представленные одномерными массивами данных, каждый из которых состоял из 64 чисел. Аудиоданные были извлечены из музыкального файла (пробной, свободно распространяемой композиции, загруженной из сети Интернет) в формате ИКМ (PCM – Pulse Code Modulation) с частотой дискретизации 44,1 кГц, глубиной кодирования 16 бит и битрейтом 705 кбит/с (моно, 1 канал). Финансовый временно́й ряд был сформирован на основе изменений цен на нефть за определенный период. К данным массивам применялись различные алгоритмы предсказания на основе функций, перечисленных ранее; полученные результаты анализировались и сравнивались между собой.

Сначала рассматривалось предсказание сигналов с помощью функции (вейвлета) Хаара, которая представляет собой простейший сигнал данного вида и часто используется в теоретических материалах и практических исследованиях для иллюстрации свойств вейвлетов. Это позволило показать влияние степени сложности функции (начиная с простейшего вейвлета Хаара) на результаты предсказания в зависимости от вида анализируемого сигнала. Следует отметить, что во время реализации данного этапа наглядно проявились основные преимущества лифтинговой схемы, описываемые в литературе [2–5]:

- быстрое вычисление (за счет снижения количества операций);
- отсутствие необходимости в дополнительной памяти (in-place computation): при реализации алгоритма не пришлось использовать дополнительных (буферных) переменных);
- простота получения обратного преобразования.

Сам же алгоритм предсказания заключается в копировании значения каждого четного отсчета на место последующего нечетного (отсчеты нумеруются с нуля; предсказываются всегда нечетные отсчеты), что,

фактически, является вычислением степени постоянства функции. В результате предсказания был получен грубый вариант исходной функции как для звукового сигнала, так и для временно́го ряда, отличающийся резкими перепадами, не свойственными первому набору данных. В числовом выражении погрешность предсказания (вычисленная как математическое ожидание соотношения разницы между исходным сигналом и предсказанным из интервала значений сигнала в процентах) оказалась равной 2,43% для аудиосигнала и еще большей (3,23%) для финансового ряда. Таким образом, применение функции Хаара для предсказания обоих видов данных показало, что, как и можно было предполагать, самый простой вейвлет приводит к высокой погрешности, постоянно отклоняясь от исходного сигнала.

При использовании линейной функции предсказания каждый нечетный отсчет вычисляется как полусумма окружающих его четных отсчетов, что приводит к вычислению степени отклонения сигнала от линейности на рассматриваемых отрезках (так называемой кусочной линейности). В результате подобного предсказания получено достаточно точное повторение исходного звукового сигнала (с заметными ошибками лишь в местах его резкого перепада) и снова грубое представление временно́го ряда. В цифрах это выразилось как средние ошибки, равные 0,62% и 3,23% для аудиосигнала и финансового ряда соответственно. Как видно, применение более сложной функции позволило значительно улучшить результат предсказания функции первого типа, но никак не повлияло на точность для данных второго типа.

Наиболее точного предсказания удалось добиться с помощью полиномиальной функции, основанной на формуле интерполяционного многочлена Лагранжа и представляющей так называемую кубическую интерполяцию, т.е. предсказание каждого нечетного отсчета на основе четырех ближайших с предыдущего уровня разложения. Для наглядности результат предсказания с помощью данной функции для аудиосигнала был представлен в графическом виде (рис. 2).

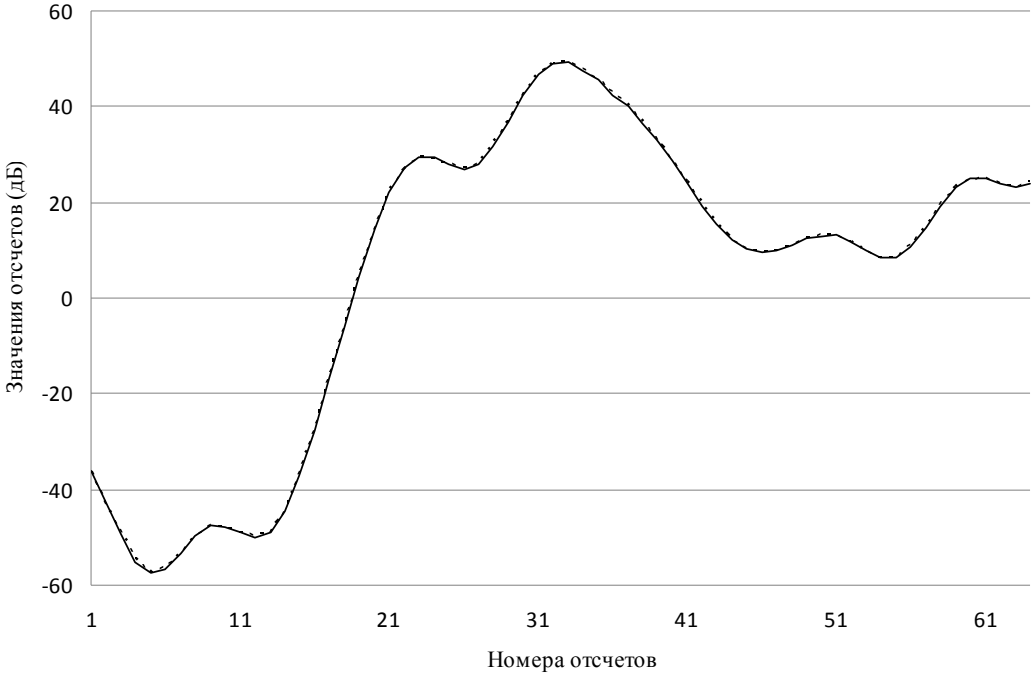



Рис. 2. Предсказание аудиосигнала с помощью полиномиальной функции: сплошная линия – исходный сигнал, пунктир – предсказанный сигнал

| Вид функции предсказания | | Хаара | Линейная | Полиномиальная |
|---|---|---|---|---|
| Аудиосигнал | Минимальная погрешность (дБ) | 0 | 0 | 0 |
| | Максимальная погрешность (дБ) | 10,71 | 1,8 | 0,69 |
| Финансовый временно́й ряд | Минимальная погрешность (USD/баррель) | 0 | 0 | 0 |
| | Максимальная погрешность (USD/баррель) | 7,31 | 5 | 5,06 |

Таблица. Диапазон абсолютных значений погрешности предсказания

Из рис. 2 видно, что существенная (и заметная на данном разрешении) погрешность для последовательности аудиоотсчетов была допущена лишь на некоторых перепадах и границе конечного сигнала; она

составила 0,23%, а в случае с финансовым рядом полиномиальная функция даже уступила своим менее сложным альтернативам, что выразилось в увеличении средней ошибки до 3,85%. Крайние абсолютные значения ошибки для обоих видов сигнала (и трех функций предсказания) представлены в таблице.

**Анализ результатов**

Подводя итоги, удобно представить колебания погрешности предсказания для различных исходных и анализирующих функций в виде диаграмм (рис. 3, 4).

Рис. 3. Погрешность предсказания аудиосигнала с помощью различных функций:
– функция Хаара; – линейная функция; – полиномиальная функция

Рис. 4. Погрешность предсказания финансового ряда с помощью различных функций:
– функция Хаара; – линейная функция; – полиномиальная функция

Изучив представленные изображения, можно отметить, что финансовый временно́й ряд – значительно более трудная для предсказания функция, чем аудиосигнал. В связи с этим на результаты ее анализа не влияет сложность используемой функции предсказания, что и подтверждалось исследованиями других авторов [4, 5]. Более гладкое и плавное представление набора аудиоотсчетов, наоборот, можно предсказать с гораздо большей точностью (рис. 3), увеличивая сложность предсказывающей функции (что проявляется в резко различающемся заполнении диаграммы для разных инструментов анализа).

Кроме того, необходимо подчеркнуть, что на практике подтвердилась и основная проблема функций предсказания для конечного сигнала, описываемая в [3, 5], – резкое возрастание погрешности на его (сигнала) границе. Особенно отчетливо данная особенность проявилась для сложных (линейной и полиномиальной) функций.

**Заключение**

Выделенные и проверенные в исследовании преимущества лифтинговой схемы подтверждают, что на данный момент она является одним из основных и наиболее удобных инструментов построения вейвлет-функций, пригодных для решения задачи сжатия звука.

Данные, полученные при реализации второго этапа лифтинга на основе трех различных функций предсказания, позволили показать их отклонения от исходного сигнала в графической форме и оценить их точность при сравнении средней погрешности. Красноречивым оказался анализ результатов, полученных по описанной общей схеме, для различных видов исходной функции – последовательности аудио отсчетов и финансового временно́го ряда. Явно проявилась зависимость влияния сложности функции предсказания на его результат от вида анализируемого сигнала. Среди рассмотренных вариантов реализации этапа предсказания лифтинговой схемы наиболее точных результатов при анализе аудиосигнала достигла полиномиальная функция. Показанная ею точность свидетельствует о том, что данный вид функций является наиболее многообещающим при решении задачи предсказания нестационарного сигнала такого вида, как звук, в лифтинговой схеме.

Сделанные в работе выводы также позволяют утверждать, что наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований являются, во-первых, реализация этапа предсказания лифтинговой схемы на базе других функций (полиномов), во-вторых, поиск решения проблемы предсказания на границах конечных сигналов.

### Литература


1. Радзишевский А.Ю. Основы аналогового и цифрового звука. – М.: Вильямс, 2006. – 288 с.
2. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. – СПб: ВУС, 1999. – 208 с.
3. Sweldens W., Schröder P. Building Your Own Wavelets at Home. – CA: SIGGRAPH, 1996. – 76 p.
4. Jensen A., La Cour-Harbo A. Ripples in Mathematics: The Discrete Wavelet Transform. – NY: Springer, 2001. – 257 p.
5. Fournier A. et al. Wavelets and Their Applications in Computer Graphics. – CA: SIGGRAPH, 1995. – 239 p.



***Пиуновский Евгений Витальевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, evgpiun@gmail.com



**УДК 004.021:004.045:004.67:004.622**


# МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПСЕВДО-СЕТЕВОЙ ВЕРСИИ БАЗЫ ДАННЫХ В MS ACCESS НА ПРИМЕРЕ ОТДЕЛА ПРОДАЖ МАЛОГО ПРЕДПРИЯТИЯ


**С.П. Макаров, Т.А. Бороненко, А.Г. Коробейников**


**(публикуется в порядке дискуссии)**


Рассмотрена проблематика и особенности сетевых баз в Access в соответствии со спецификой предметной области. Предлагается архитектура для построения базы данных. Смоделирована миграция данных по всем узлам построенной модели псевдо-сетевой версии базы данных. Проанализирована динамика модели. На примере отдела продаж малого предприятия показана эффективность разработанной модели.



**Ключевые слова:** моделирование, сетевые базы данных, сетевая архитектура, MS Access, архитектура файл-сервер, AllFusion Process Modeller, нотация IDEF0.


### Введение

Специфика экономических процессов в наше время заставляет малые предприятия искать более простые и удобные решения обработки, анализа и хранения финансово-экономических данных. Это ниша программного обеспечения, управляющего базами данных (БД). В данный момент наиболее доступным и простым решением является использование СУБД Microsoft© Access 2003 (в дальнейшем MS Access). Один из основных плюсов разработки на MS Access – плотная связь с Microsoft Office. Для работы созданного приложения достаточно установить Microsoft Office (в дальнейшем – «Офис»). При этом устанавливаются все необходимые для работы MS Access библиотеки, драйверы работы с базами данных (ODBC, OLEDB, MS ADO и т.д.). Кроме того, MS Access во многом совместим с СУБД Microsoft SQL Server и другими форматами баз данных [1].

### Проблематика и особенности сетевых баз в Access

К сожалению, MS Access имеет существенный минус – в нем отсутствует возможность реализации полноценной сетевой версии СУБД «клиент–сервер». MS Access не имеет собственной серверной компоненты, но в этом продукте реализована возможность применить технологию ADO, которая имеет поддержку локальных СУБД различных типов [1]. Таким образом, проблему отсутствия возможности реализации полноценной сетевой версии БД «клиент–сервер» можно решить путем создания псевдосетевой версии БД.

Один из наиболее распространенных методов реализации сетевой БД в MS Access базируется на использовании монопольного доступа. В данной конфигурации единый MDB-файл располагается только на сетевом сервере. Основные положения метода заключаются в следующем.

- Пользователи получают доступ к базе данных при обращении к единому MDB-файлу на сервере.
- При совместной работе нескольких пользователей с БД MS Access сохранение изменений возможно только в случае открытия БД в монопольном режиме. В этом случае пользователи в режиме поиска и считывания практически не зависят от пользователей, изменяющих информацию. Пользователь, монопольно изменяющий информацию, подлежит индивидуальной регулировке доступа к информационным структурам.
- При попытке внести изменения в структуру объекта БД (кроме таблиц и запросов) или элемента в режиме общего доступа MS Access временно предоставляет пользователю (частично) монопольный доступ к БД MS Access [2]. После сохранения всех изменений структуры и закрытия всех окон режима конструктора (или завершения процесса, в контексте которого были произведены изменения данных) MS Access возвращает БД MS Access в режим общего доступа. До этого времени другие пользователи не имеют возможности вносить изменения в БД. Если встроенный локальный редактор программных модулей MS Access (Visual Basic Editor – VBE), VisualStudio.NET или прочие подобные продукты запущены в данный момент и частично блокируют фрагменты БД, необходимо сохранить все открытые модули и закрыть приложение, чтобы вернуть БД в режим общего доступа.
- При попытке внесения серьезных изменений (например, изменения формы ввода или отображения данных) в БД MS Access, открытую несколькими пользователями в режиме общего доступа, MS Access выводит предупреждение о том, что изменения могут быть не сохранены.

Данный метод подразумевает, что все формы, отчеты, модули, запросы, EXE-файлы Access, а также все библиотеки DLL и т.п., должны передаваться по сети на рабочую станцию, сетевой трафик возрастает, а производительность значительно снижается.

К тому же данный метод не обеспечивает возможности работы с БД при отсутствии сетевого подключения или нарушении работы локальной сети, что понижает мобильность рабочих станций (например, при использовании в качестве рабочих станций ноутбуков).

В условиях отдела продаж малого предприятия, в котором ноутбуки используются в качестве пользовательских рабочих станций и периодически не имеют подключения к локальной сети, возникает потребность использования иного метода реализации БД.

Таким образом, ставится задача предложить и смоделировать работу более эффективного метода реализации БД, который позволяет работать с БД одновременно нескольким пользователям, а также дает возможность запускать БД и открывать данные для чтения в условиях отсутствия подключения к локальной сети. В работе предлагается решение с применением связующего звена. Это решение назовем псевдо-сетевой версией БД, поскольку для реализации этого решения используется несетевая СУБД MS Access. Основные положения следующие.

- Существует файл-сервер, на котором хранятся все MDB-файлы, используемые БД, с внесенными в таблицы наборами сведений.
- Пользовательские станции хранят на своих жестких дисках MDB-файлы, загруженные с файл-сервера.
- Администратор экспортирует актуальные данные на сервер, импортирует данные из внешних источников к себе на жесткий диск. Также данные можно вносить посредством пользовательского интерфейса на рабочей станции администратора.
- Обновление данных осуществляется как при каждом запуске БД на пользовательской рабочей станции, так и периодически в установленный пользователем момент.

### Архитектура и моделирование работы базы данных

Архитектура модели псевдо-сетевой БД состоит из трех основных модулей (рис. 1).

- Административный модуль – БД, реализованная посредством MS Access, в которой доступен просмотр, внесение и изменение данных, а также экспорт их на серверный модуль.
- Серверный модуль (в дальнейшем сервер) – пространство на общедоступном сетевом диске, где хранятся файлы БД с наборами сведений предметной области.
- Пользовательский модуль – БД, реализованная посредством MS Access, по сути, являющаяся частичной копией административного модуля, в которой доступны только просмотр и импорт данных с сервера.

В административный модуль вносятся данные (набор сведений). Это может происходить двумя способами:

- пользователь, оперирующий административным модулем (далее – администратор) вносит изменения или корректирует имеющиеся данные;
- администратор импортирует данные (набор сведений) из внешних источников (бухгалтерской или/и складской программы, представленных в виде таблиц Microsoft (c) Excel 2003).

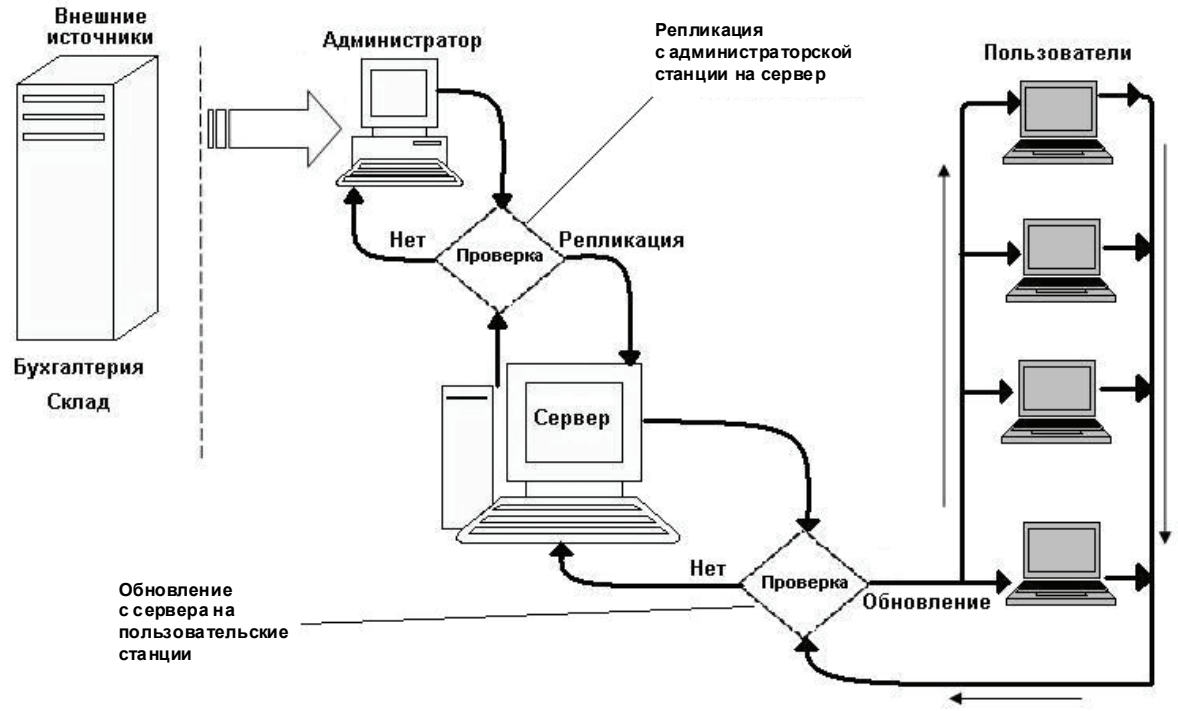



Рис. 1. Архитектура псевдо-сетевой базы данных

Администратор реплицирует их со своей рабочей станции на сервер с целью обновить имеющиеся данные и поддержать их актуальность.

Пользователь, оперирующий пользовательским модулем (в дальнейшем – пользователь), при запуске реплицирует данные с сервера на свою рабочую станцию с целью поддержания актуальности данных, либо использует уже имеющиеся у себя на диске при отсутствии подключения к локальной сети.

Миграция данных осуществляется по цепочке: внешний источник, администратор, сервер, пользователь.

Здесь следует обратить внимание на два момента (рис. 1):

1. *Момент репликации администратором данных на сервер*. В момент репликации данных администратором на сервер осуществляется проверка на их актуальность. С помощью клиентского программного обеспечения TortoiseSVN системы контроля версий Subversion осуществляется контроль внесения изменений в файлы БД. С помощью данной системы из файлов БД, хранящихся на сервере, формируется специальное абстрактное хранилище, в которое включаются все файлы БД, административный и пользовательские модули, а также ведется история изменений файлов. Администратор при помощи TortoiseSVN посылает запрос на проверку актуальности данных на своей рабочей станции и на сервере. Система Subversion синхронизирует файлы и анализирует историю изменений файлов. Если данные на сервере актуальны, то обновление не происходит. Это позволяет снизить загруженность сети и файлов на сервере. Если же данные на сервере не актуальны, то происходит внесение всех изменений в хранилище. Аналогичный процесс протекает и в обратном направлении: если на рабочей станции данные не актуальны, то в рабочую копию администратора вносятся изменения из хранилища. При сохранении новых версий пользовательских модулей используется дельта-компрессия: система находит отличия новой версии от предыдущей и записывает только их, избегая дублирования данных. Соответствующая история по любым изменениям, внесенным в файлы, сохраняется в специальном журнале на сервере.
2. *Момент обновления данных на пользовательской рабочей станции с сервера.* При запуске программы пользователем автоматически осуществляется проверка на необходимость обновления данных с сервера в пользовательский модуль. Если данные у пользователя идентичны данным на сервере, то они не обновляются, чтобы также не замедлять работу приложения, сети и сервера. Репликацию с сервера пользователь также может осуществить принудительно во время работы программы при помощи пользовательского интерфейса TortoiseSVN, так как при длительной работе с данными в пользовательском архиве, данные на сервере могут поменяться. В процессе этого вида репликации пользовательский модуль освобождает все активные файлы, и осуществляется процесс проверки данных на актуальность, идентичный процессу проверки при репликации данных с административного модуля на сервер.

Также при наличии локальной сети администратор и пользователь могут вносить изменения непосредственно в некоторые таблицы (что определяется реализацией интерфейса пользовательского и адми-

нистративного модуля) на сервере, при этом доступ к этим таблицам реализуется с построчной блокировкой записей при помощи технологии ADO. MS Access блокирует изменяемую в данный момент запись, не позволяя изменять ее другим пользователям. Заблокированными могут оказаться другие записи, расположенные рядом на диске. Если другой пользователь пытается изменить заблокированную запись, в его объекте в режиме таблицы появляется специальный маркер, который указывает, что вносятся изменения и запись заблокирована. При попытке ввести данные в заблокированную запись раздается звуковой сигнал. При попытке одновременного внесения изменений в запись пользователем и администратором приоритет отдается администратору. При попытке одновременного внесения изменений в запись несколькими пользователями, приоритет отдается пользователю с наиболее высоким значением в списке приоритета (реализованном с помощью встроенного локального редактора программных модулей MS Access Visual Basic Editor – VBE). С помощью интерфейса пользовательского модуля определяется набор таблиц, в которые пользователь может вносить изменения. Реализуется это посредством меню с наличием или отсутствием пунктов, обеспечивающих доступ к просмотру форм, использующих определенные таблицы. Эти наборы таблиц достаточно индивидуальны, и пересечение таблиц в них встречается достаточно редко, что делает конкуренцию доступа к данным незначительной (например, пользователь, работающий только с продажами; пользователь, работающий с остатками на складах; пользователь, работающий с бонусами, премиями, акциями). Эта стратегия не является основной, а используется как дополнительный способ поддержания целостности данных. Она доступна только при работе в локальной сети.

Процесс восстановления данных при сбое рабочей станций или сервера осуществляется путем восполнения или замены поврежденных данных из специальных резервных копий, данных на сервере и на оптическом носителе. Для этого применяются:

- RAID 1, обеспечивающий восстановление самой свежей информации. Файлы, расположенные на сервере с RAID, более защищены от поломок, чем хранящиеся на локальной машине;
- ручное или автоматическое копирование на оптический носитель, с помощью которого используется специализированная программа резервного копирования (System Center Data Protection Manager).

При дефектах файлов БД на сервере, возникших в ходе репликации с пользовательских станций или при частичном физическом выходе из строя серверного оборудования, MS Access предупреждает с помощью системного сообщения о невозможности открытия файла. Администратор вручную восполняет поврежденные данные за счет синхронизации с заранее созданной резервной копией БД на сервере с RAID 1. Резервная копия ежедневно создается автоматически при помощи System Center Data Protection Manager, формируя список контрольных точек для восстановления БД. При повреждении данных в БД на администраторской или пользовательской рабочей станции, восстановление происходит путем принудительной репликации данных с сервера на станции. При повреждении файлов модулей администратора или пользователя происходит процесс восстановления, аналогичный процессу восстановления администратором БД на сервере, при котором вручную осуществляется запуск cmd-файла на рабочей станции, файлы модулей синхронизируются с резервной копией и восполняются. При необходимости администратор может создавать резервную копию вручную на сервере, внешнем жестком диске или DVD. При использовании такого метода восстановления БД максимальная потеря данных составляет объем изменений, внесенных в БД за один рабочий день, что является некритичным, и может быть восполнена повторным внесением данных в БД вручную.

Специфика и динамика движения данных в рамках разных условий требует более наглядного моделирования процесса работы сетевой БД. Для визуализации процессов обработки данных можно использовать программное средство AllFusion Process Modeller: BPwin 4.1 от студии Computer Associates [3]. Моделирование обработки данных осуществляется с помощью нотации IDEF0©. Вся модель разбита на диаграммы разного уровня. Ее архитектура выглядит следующим образом: существует диаграмма верхнего уровня, которая декомпозируется на диаграммы нижних уровней, отражающие все происходящие процессы в родительской диаграмме [4].

Верхним уровнем является диаграмма «Работа базы данных ОП», она отражает процесс работы базы данных под воздействием на нее входящей информации и данных из других отделов предприятия и получившийся результат.

Эта диаграмма декомпозируется на три дочерние диаграммы: «Администрирование» (Модуль Администратора), «Хранение на файловом сервере» (Файловый сервер), «Обработка пользователем» (Модуль Пользователя). Здесь отображены все процессы, связанные тремя основными составляющими псевдо-сетевой базы данных (рис. 2).

1. Администратор получает финансовые данные (данные по закупкам, продажам, остаткам, бюджетам и т.д.), адаптирует их и реплицирует на сервер, на сервере сортирует, каталогизирует и архивирует их.
2. Сервер хранит полученные с администраторской станции данные, к которым обращаются пользователи для копирования на свои рабочие станции и изменения. Администратор также обращается к данным, хранящимся на сервере, для их восстановления или изменения.
3. Пользователь получает данные на свою рабочую станцию, просматривает их, а также копирует измененные файлы с данными с сервера к себе на жесткий диск.

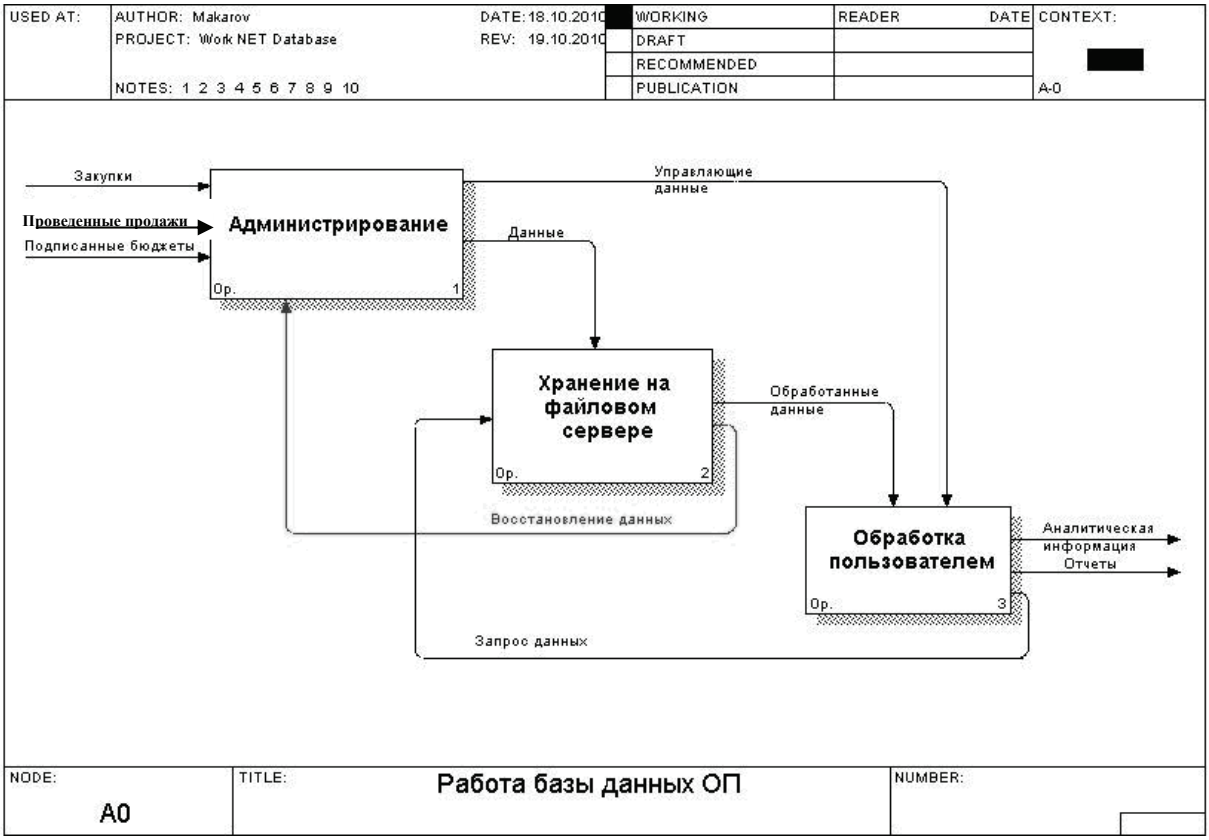



Рис. 2. Диаграмма верхнего уровня, отображающая миграцию данных

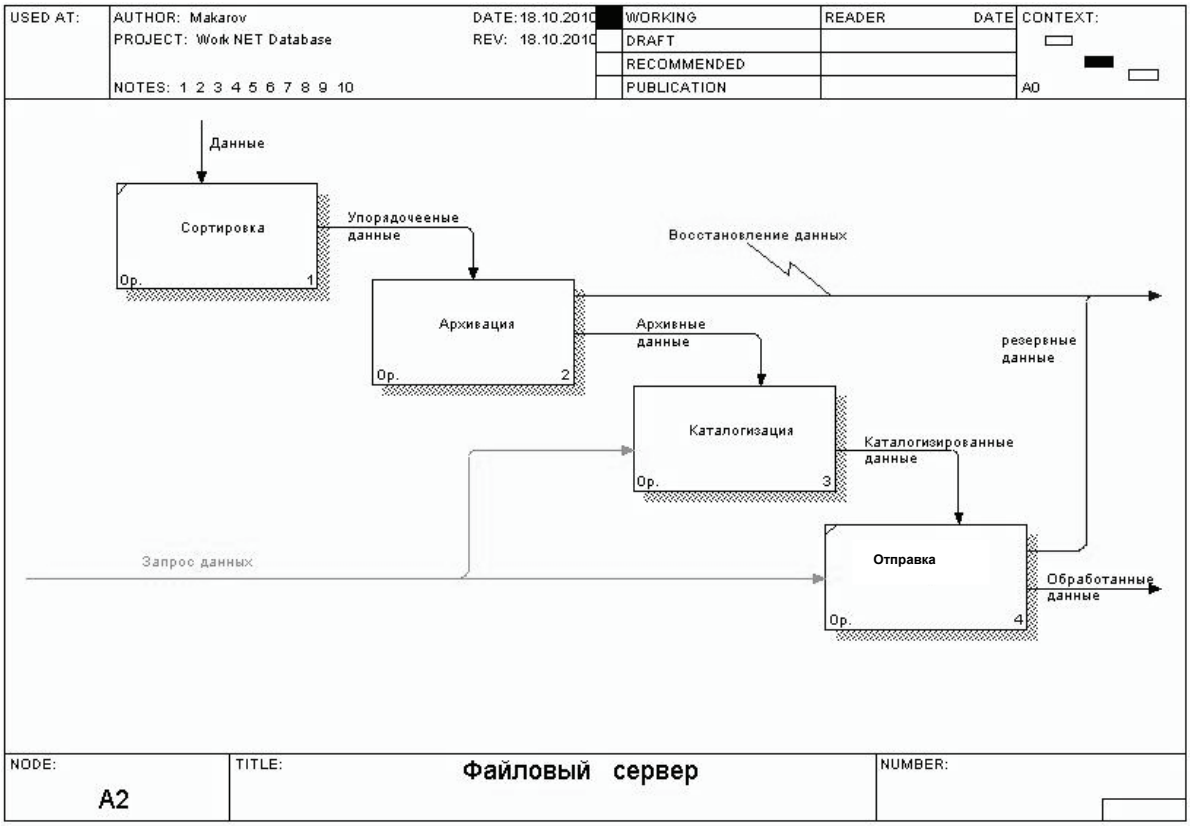



Рис. 3. Диаграмма процессов, происходящих на уровне сервера

Дальнейшая декомпозиция диаграмм «Администрирование», «Хранение на файловом сервере», «Обработка пользователем» (рис. 2) позволяет более полно смоделировать процессы, происходящие на конкретных узлах этой структуры БД. Рассмотрим схему диаграмм, получившуюся при декомпозиции диаграммы «Хранение на файловом сервере» (Файловый сервер) (рис. 3).

В этот узел данные мигрируют из административного модуля и хранятся на нем. Здесь осуществляется консистенция всех проблемных данных. Администратор может манипулировать данными на сервере – сортировать, архивировать и каталогизировать их. Также данные могут изменяться администратором и восстанавливаться путем репликации из административного модуля либо подготавливаться и отправляться на рабочую станцию пользователя по его запросу. Данные на этом узле системы могут использоваться параллельно пользователями в режиме чтения. Администратор обрабатывает данные в монопольном режиме. Доступ к этому узлу системы реализован при помощи групповых политик серверного программного обеспечения на основе Active Directory и распространяется только на участников группы отдела продаж и администратора.

За счет использования данного метода реализации БД, осуществляется довольно равномерное распределение плотности данных в этой конфигурации. Концентрация проблемных данных осуществляется на сервере, а управляющие элементы БД распределены между рабочими станциями пользователей и администратора, что позволяет эффективнее использовать ресурсы системы и сети, в которой она находится.

Данную модель работы псевдо-сетевой БД можно представить схематично в виде иерархии [5] (рис. 4).

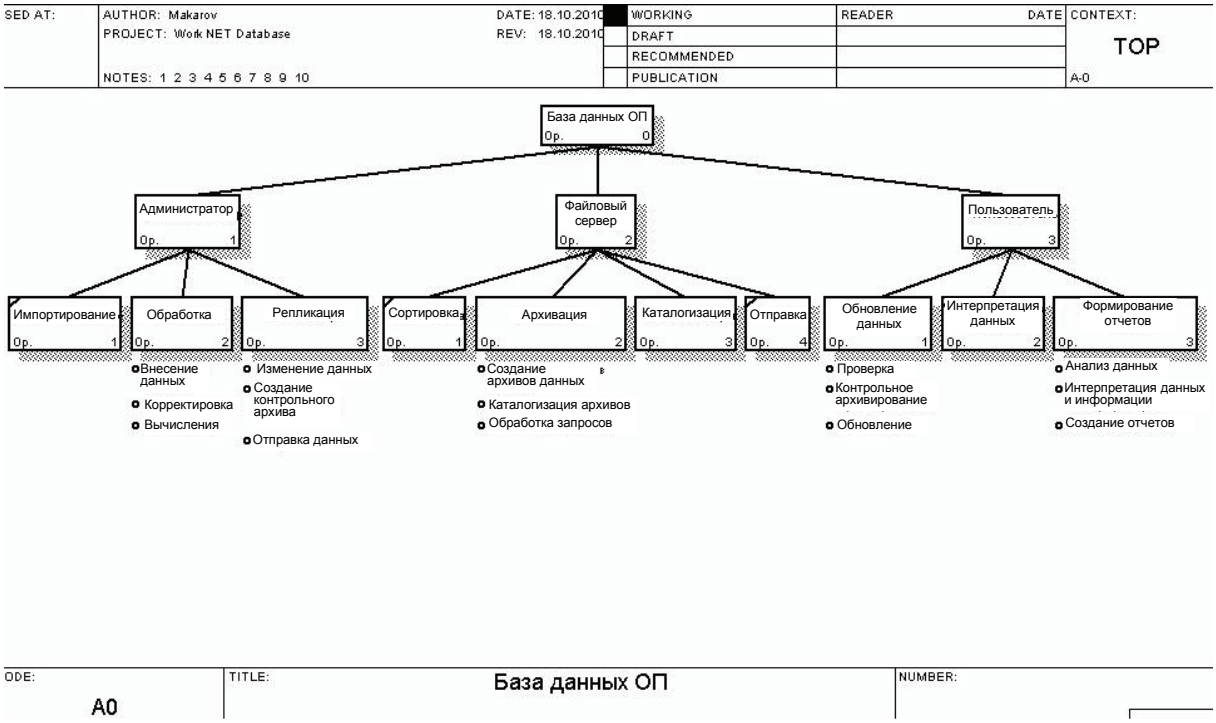



Рис. 4. Иерархия модели работы псевдосетевой базы данных

**Результат применения**

Смоделированный метод реализации псевдо-сетевой БД был применен в рамках отдела продаж малого предприятия ООО «РусХенк» – филиала, находящегося в Ленинградской области. В отделе используются 9 ПК: 8 пользовательских и администраторский компьютер, а также компьютер-сервер. Такая конфигурация сети позволяет оптимально воспользоваться этой моделью. Результатом ее применения стало следующее.

- Снижена нагрузка на физические файлы, содержащие данные и плотности распределения данных, что позволило увеличить скорость обработки информации.
- Снижена нагрузка на все рабочие станции сети отдела продаж за счет распределения нагрузки сохранения и обработки данных.
- Пользователь получает возможность изменять формы, отчеты и другие объекты в собственной клиентской базе данных, не влияя при этом на других пользователей, за счет использования пользовательского модуля, а также параллельно изменять данные в таблицах (определенных конкретным интерфейсом пользовательского модуля).

– Обеспечена мобильность данных за счет возможности работы пользователя с БД при отсутствии подключения к локальной сети (при использовании ноутбуков в качестве рабочих станций и работы вне отдела).
– Создан дополнительный уровень безопасности хранения данных. Теперь при выходе из строя любой из рабочих станций отдела данные остаются в полных резервных копиях на сервере и съемных оптических носителях.

Процесс моделирования позволил эффективно применить описанное решение в условиях отдела продаж, а использование продукта из наиболее распространенного и известного пакета программ – упростить освоение программы персоналом и ускорить адаптацию.

**Заключение**

Результатом исследования явилась модель распределенной БД и модель ее работы, которая отражает динамику данных и функционал БД. Это позволило проследить миграцию данных от входа в систему до передачи их конечному элементу – пользователю.

Суть подхода заключается в том, каждый пользователь работает со своей локальной частичной копией проблемных данных. При запуске пользовательского модуля идет проверка на необходимость синхронизации локально частичной копии данных с сервером. Пользователь также может принудительно инициировать проверку на необходимость синхронизации данных посредством пользовательского модуля, после чего данные синхронизируются с центральным хранилищем через процесс серверного типа, который монопольно обрабатывает данные.

Полученная модель БД смоделирована с учетом специфики миграции данных в отделе продаж компании, использующей небольшую пользовательскую нагрузку на данные, но может применяться и для реализации других решений при определенной адаптации.

**Литература**

1. Кен Блюттман. Анализ данных в Access. Сборник рецептов. – СПб: Питер, 2008 . – 352 с.
2. Microsoft Office // Справка и инструкции по Access [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://office.microsoft.com/ru-ru/access-help/, своб.
3. Маклаков С.В. Создание информационных систем с AllFusion Modeling Suite. – М: Диалог-МИФИ, 2007. – 400 с.
4. Дубейковский В.И. Практика функционального моделирования с ALLFusion Process Modeler 4.1. Где? Зачем? Как? – М: Диалог-МИФИ, 2004. – 464 с.
5. SDTEAM.COM // Сравнительный анализ нотаций [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.sdteam.com/?tid=6485, своб.

***Макаров Сергей Петрович*** – Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, аспирант, immoral-idiom@rambler.ru

***Бороненко Татьяна Алексеевна*** – Ленинградский государственный университет им. А.С. Пушкина, доктор педагогических наук, профессор, зав. кафедрой, tataleks@mail.ru

***Коробейников Анатолий Григорьевич*** – Санкт-Петербургский филиал учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова РАН», доктор технических наук, профессор, зам. директора, Korobeynikov_A_G@mail.ru

**УДК 681.142**

# ЗАДАЧИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ КАЧЕСТВА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В DTN СЕТЯХ

**Б.А. Крылов, А.Е. Курников**

Приведено краткое обоснование необходимости исследования качества работы телекоммуникационных сетей, в частности, сетей DTN (Delay-Tolerant Networks), терпимых к задержкам времени. Рассмотрены основные отличия протоколов, используемых в традиционных компьютерных сетях и сетях DTN. Описана проблема использования стандартных протоколов в сетях, терпимых к задержкам времени. Сформулированы вопросы, которые необходимо решать в дальнейших исследованиях в этой области для повышения качества работы DTN сетей.
**Ключевые слова:** DTN сети, надежность сетей, задержки в каналах передачи данных.

**Введение**

В последнее время активное внедрение компьютерных сетей во многие области жизнедеятельности человека привело к тому, что одними из основных проблем в этом направлении являются проблемы пропускной способности каналов передачи информации, их функционирование и надежность. Как из-

вестно, в настоящее время основными показателями работы сети принято считать такие характеристики, как надежность, функциональность, пропускная способность и др. [1].

### Особенности работы протоколов в сетях DTN

Одним из ключевых показателей качества работы компьютерной сети является надежность передачи информации по сети, а именно, вероятность доставки сообщения до получателя, время, за которое это сообщение будет доставлено, и равнозначность отправленного и полученного сообщений.

Однако существуют ситуации, в которых показатель вероятности того, что сообщение вообще дойдет до принимающего устройства, может стремиться к нулю. Так, например, в случае нарушения или отсутствия соответствующей технической инфраструктуры сигнал просто не дойдет до ближайшего узла коммутации, как это может быть в случае природных или техногенных катастроф [2]. Также в одной из самых важных для человечества, космической отрасли, в настоящее время весьма существенной проблемой является увеличенное время отклика сигнала, которое наблюдается при сеансах межпланетной и спутниковой связи. Например, в случае передачи сигнала на орбитальные станции других объектов Солнечной системы время задержки может достигать нескольких часов. Так, сигнал с Земли до Сатурна идет около часа [3].

Не вызывает сомнения тот факт, что надежность обеспечения сверхдальней космической связи является очень актуальной в настоящее время. Даже если рассматривать такую знакомую всем область как использование мобильной связи, то и в этом случае также в современных коммуникационных сетях мобильной телефонии часто встречаются ситуации, при которых становится невозможным передавать информацию в сети. Например, в случае большой загрузки базовой станции мобильной сети и превышении максимально допустимого (критического) времени отклика выполнение запросов к серверу оказывается весьма проблематичным.

Чтобы изменить ситуацию в лучшую сторону, предпринималось множество попыток разработать новые протоколы (правила передачи данных в сети), так как существующие традиционные протоколы с такой задачей не справляются. Передача данных может вообще не состояться, и сообщение может не быть получено в силу особенностей существующих протоколов.

В настоящее время сценарий работы традиционных протоколов для работы сетей базируется на определенных предположениях. Так, одним из главных предположений, лежащих в основе стандартного протокола для компьютерных сетей TCP/IP, является то, что времена задержки на всем протяжении пути пакета от источника к месту назначения невелики. Для установления соединения в протоколе TCP используется правило «three way handshake»: время установления соединения пропорционально значению времени задержки пакета в сети. Но если задержки времени являются достаточно большими, то, например, обычный браузер (средство просмотра страниц в Интернете) как правило, выдает сообщение «Ошибка номер 403 – Ресурс не найден», – и информация не сможет быть получена пользователем. Кроме того, следует заметить, что перед отправкой пакета в традиционных сетях необходимо осуществлять преобразование адреса из доменного имени в IP-адрес, а затем из IP-адреса в MAC-адрес. Такое преобразование предполагает наличие соответствующей инфраструктуры, а именно, – определенных DNS-серверов, маршрутизаторов, шлюзов и т.д. Если такая инфраструктура отсутствует, работоспособность сети будет нарушена практически на всех уровнях модели OSI, начиная с отсутствия связи на физическом уровне и заканчивая невозможностью работы приложений на верхнем уровне.

Трудности использования традиционных протоколов в сетях с задержкой времени касаются не только транспортного уровня и протокола TCP/IP, но и протоколов прикладного уровня. Использование традиционного протокола прикладного уровня (HTTP) становится затруднительным, поскольку схема работы HTTP-протокола, основанная на том, что в ответ на первоначальный GET-запрос некой порции данных (например, HTML-страницы), создаются дополнительные GET-запросы для получения встроенных в страницу объектов (например, изображений), предполагает те же условия работы, что и схема работы протокола TCP. Таким образом, можно сделать вывод, что в сетях с задержкой времени интерактивный обмен многочисленными сообщениями становится невозможен ни с теоретической, ни с практической точек зрения.

Для решения проблем TCP/IP протокола в сетях с большими временами задержки передачи сообщений разработан новый протокол сетевого уровня DTN (Disruption-Tolerant Networking), предложенный Кевином Фолом [4]. Данный протокол основан на парадигме «хранить данные и перенаправлять их дальше». Этот протокол оперирует специальными единицами информации – bundle. По сути, bundle – это сообщение, содержащее в себе, наряду со значимым для приложения содержимым, также и необходимую для маршрутизации информацию. Узлы DTN, обмениваясь bundle'ами, хранят их. По мере появления связи со следующим узлом данный bundle пересылается дальше, пока не будет достигнут узел назначения или время жизни bundle'а истечет.

DTN (Delay-Tolerant Networking), изначально разработанный как протокол дальней космической связи, получает все большее применение и в компьютерных сетях. В разработке протокола принимал участие Винт Серф (Vint Cerf), ныне вице-президент компании Google. Изначально DTN был задуман как

«межпланетный Интернет», а в данный момент представляет собой протокол для сетей с большим временем задержки сигнала. Однако следует заметить, что традиционный протокол передачи данных прикладного уровня по семиуровневой модели OSI – HTTP не может решить возникающие в новых условиях проблемы, т.е. работать «поверх» DTN в DTN сетях из-за своих особенностей, таких как многочисленные пары «запрос–ответ», необходимых для загрузки одной страницы. DTN существенным образом отличается от привычных протоколов (например, TCP или UDP). Его особенностью является доставка данных вне зависимости от текущего состояния каналов связи. Для «классических» протоколов в случае невозможности доставки данных в «текущий» момент они удаляются. В DTN реализован иной принцип работы: «сохрани и передай» (Store and Forward) [5]. При получении данных для узла, в настоящий момент находящегося вне зоны доступа, данные сохраняются. После нахождения маршрута до получателя (или самого получателя) данные передаются на следующий узел. Одновременно с разработкой подобных протоколов встает проблема оценки надежности и качества работы такой сети. Очевидно, что модели надежности для сетей, работающих на традиционном протоколе TCP, в случае DTN сети не подходят. Кроме того, очевидно, что при сохранении аппаратной части компьютерной сети при переходе на протокол DTN изменится сегмент транспортной сети, отвечающий за технологию передачи данных.

На рисунке представлена архитектура протоколов, используемых в DTN сетях.

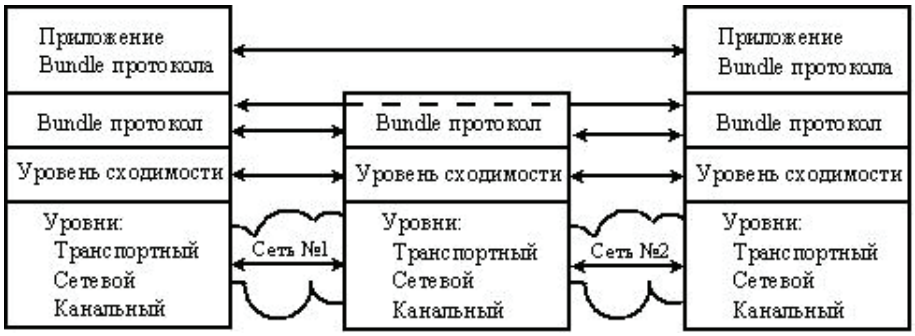



Рисунок. Архитектура DTN протоколов

В связи с вышеизложенным возникает необходимость в частичной модификации протокола HTTP для работы в DTN сетях. Дальнейшие исследования в этой области сосредотачиваются на возможности разработки соответствующих средств прикладного уровня, способных работать в сетях DTN. Характеристики качества и надежности работы DTN сетей складываются из качественного программного обеспечения, из технической инфраструктуры и коммуникационных линий сети. Качество работы сети характеризуется, прежде всего, ее устойчивостью к сбоям, минимизацией времени для восстановления после сбоя, а также вероятностью доставки сообщения до получателя и другими не менее важными характеристиками функционирования сети. Для дальнейшего сравнения моделей оценки качества и надежности традиционных и DTN сетей необходимо оценить реализацию одних и тех же функций. Однако сравнение сетей, построенных на традиционных протоколах передачи данных, и DTN сетей является достаточно сложной и интересной задачей. Необходимо выделить основные характеристики качества телекоммуникационных сетей, по которым можно оценивать и сравнивать работу сетей, а также сделать выводы о качестве функционирования данных сетей. Эти предпосылки могут лечь в основу дальнейших исследований в этой области.

## Заключение

Приведено краткое обоснование необходимости исследования качества работы телекоммуникационных сетей, в частности, сетей DTN, терпимых к задержкам времени. Дается краткое описание отличий работы DTN сетей от традиционных телекоммуникационных сетей. Приводится описание необходимости разработки характеристик DTN сетей для построения модели надежности функционирования данных сетей. В работе описываются протоколы традиционных и DTN сетей и их особенности. Описана проблема использования стандартных протоколов в сетях, терпимых к задержкам времени. Сделан вывод о необходимости модификации традиционных сетевых протоколов для их использования в DTN сетях. Сформулированы вопросы, которые необходимо решать в дальнейших исследованиях в этой области для повышения качества работы DTN сетей. В дальнейшем представляется интересным создание программного комплекса для диагностики телекоммуникационных DTN сетей, расчета их надежности и оценки качества функционирования.

## Литература

1. ИСО/МЭК 9126 Информационные технологии. Оценка продукции программного обеспечения. – Женева: Международная организация стандартов, 1991. – С. 1–6.

2. Wood Lloyd, Holliday Peter, Floreani Daniel and M. Wesley. Eddy, Sharing the dream // Workshop on the Emergence of Delay-/Disruption-Tolerant Networks (E-DTN), part of the International Conference on Ultra Modern Telecommunication (ICUMT). – St. Petersburg: Russia, 14 October, 2009. – P. 1–2.
3. Ivancic Will, Eddy Wes, Wood Lloyd, Northam James and Chris Jackson. Experience with delay-tolerant networking from orbit // International Journal of Satellite Communications and Networking, special issue for best papers of ASMS 2008. – September-December 2010. – V. 28. – Is. 5–6. – P. 335–351.
4. Special issue on DTN // Journal of Communications. – 2010. – V. 5. – № 2. – P. 106–130.
5. Wood Lloyd, Holliday Peter, Floreani Daniel and Psaras Ioannis. Moving data in DTNs with HTTP and MIME // Workshop on the Emergence of Delay-/Disruption-Tolerant Networks (E-DTN), part of the International Conference on Ultra Modern Telecommunication (ICUMT). – St. Petersburg: Russia, 14 October 2009. – P. 1–4.

***Крылов Борис Алексеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, krylovb@mail.ru

***Курников Арсений Евгеньевич*** – Университет Аалто, Финляндия, научный сотрудник, arseny07@mail.ru

**УДК 681.2**

# МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТРЕХМЕРНОГО ПЕЧАТНОГО УЗЛА

**О.В. Кузнецова, Е.Б. Романова**

Предлагается метод проектирования трехмерного печатного узла посредством сплошных конструктивов. Делается вывод о возможности повышения эффективности САПР печатных узлов за счет увеличения скорости размещения электронных компонентов на плате и за счет совершенствования автоматизации инженерных расчетов.

**Ключевые слова:** проектирование печатных плат, трехмерное моделирование, САПР, твердотельное моделирование, компоновка электронных устройств.

## Введение

Современные САПР используют трехмерное моделирование, которое, в отличие от двухмерного, позволяет описывать изделие более полно [1]. Из трехмерной модели автоматически можно создать изображения разрезов и сечений. При этом между такими отдельными изображениями существует строгая связь, так как все они являются производными от общей трехмерной модели.

Использование трехмерной модели дает следующие преимущества: наглядность; удобство разработки и быстрота модернизации; автоматизированные инженерные расчеты; ассоциативность, т.е. автоматическое внесение изменений во все составляющие электронного описания изделия при изменении какого-либо из компонентов изделия; создание прототипа изделия по Rapid Prototyping-технологии [2]. Rapid Prototyping-технологии – это современные технологии быстрого прототипирования, предоставляющие возможность получать физические детали и модели посредством послойного наращивания материала (пластика, жидкой смолы, специальных порошков, различных листовых материалов) путем преобразования данных, поступающих из САПР (в формате STL), и реализовывать проекты в трехмерном представлении.

В современных САПР печатных узлов (под печатным узлом понимается печатная плата с установленными на ней электронными компонентами), как правило, используется двухмерное моделирование: примерами являются PCAD, OrCAD, Mentor Graphics. А трехмерные САПР печатных узлов (ПУ), такие как Altium Designer и CADSTAR, имеют недостаточный функционал для полноценного проектирования трехмерных печатных узлов. САПР ПУ изначально разрабатывались как двухмерные системы, и теперь в эти САПР добавляют функции для трехмерного моделирования ПУ, такие как создание трехмерного объекта посредством экструзии (перемещением плоских фигур в пространстве) и замена двухмерных объектов на трехмерные объекты. Примером является Altium Designer. При этом в Altium Designer отсутствует возможность создавать трехмерный объект сложной формы. При замене двухмерных объектов на трехмерные объекты последние загружаются в Altium Designer извне, а не создаются в самой САПР. При этом выявляются такие недостатки: контактные площадки для выводов электронных компонентов (ЭК) в трехмерных моделях отсутствуют, конструктив печатной платы (ПП) остается двухмерным, и, как следствие, отсутствует возможность автоматизированного контроля расположения переходных отверстий и возможность автоматизированных инженерных расчетов (с учетом толщины платы). В CADSTAR имеется программный модуль BoardModeler Lite, в котором трехмерная модель создается посредством передачи двухмерной модели печатного узла из редактора топологии, т.е. в программе CADSTAR 3D нельзя проектировать топологию и поэтому ее скорее можно отнести к дополнительным утилитам САПР CADSTAR, чем назвать саму CADSTAR – системой трехмерного моделирования. Пример трехмерной модели ПУ сформированной в модуле BoardModeler Lite приведен на рис. 1.

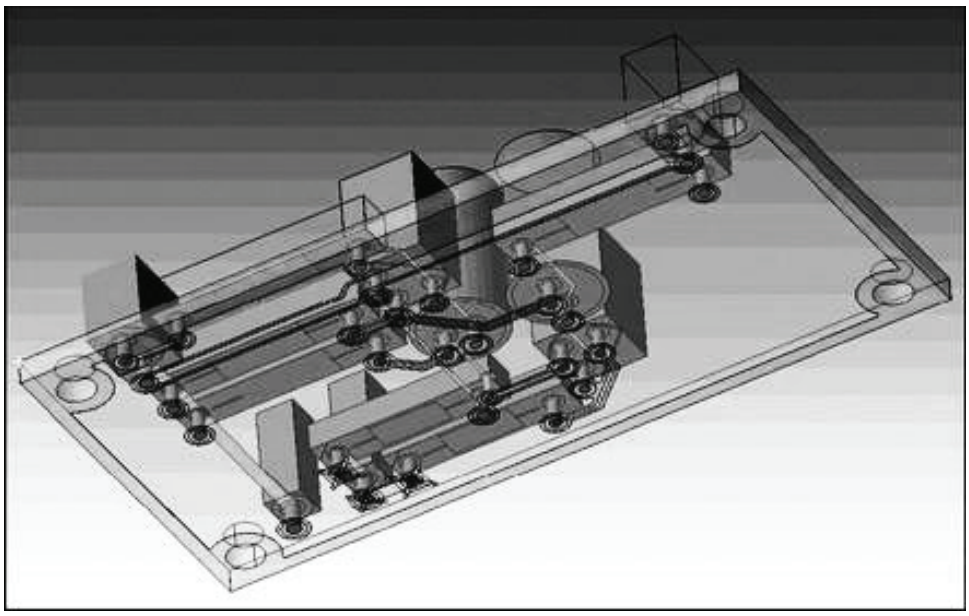


Рис. 1. Трехмерная модель ПУ в BoardModeler Lite

Для формирования трехмерной модели ПУ на основе двухмерной используют конвертацию данных о модели из САПР ПУ в машиностроительную САПР (AutoCAD, КОМПАС, SolidWorks, T-FLEX CAD, Pro/ENGINEER и другие). В машиностроительной САПР формируют трехмерные ЭК посредством экструзии или заменой двухмерных моделей ЭК на трехмерные. Также посредством экструзии формируют трехмерную модель платы и конструктивных элементов (крепежа, деталей). Таким образом, получается трехмерная модель ПУ, которую используют при разработке трехмерной модели электронного устройства (под электронным устройством подразумевается функционально законченное электронное изделие, включающее печатные платы).

Использование в редакторе топологии ПП пространственной (трехмерной) модели ПУ, включающей трехмерную модель платы и трехмерные модели ЭК с контактными площадками, а также трехмерные модели деталей для ЭК и трехмерные ограничительные зоны, позволит увеличить скорость разработки изделий, а также повысить качество электронных устройств (ЭУ).

Методы проектирования трехмерных печатных узлов в редакторе топологии ПП должны включать разработку трехмерных ЭК с контактными площадками, использование трехмерного моделирования конструктива платы, формирование трехмерных ограничительных зон в соответствии с формой корпуса и формой крепежных элементов. Это позволит оптимизировать методы автоматизации контроля технологических параметров и автоматизировать инженерные расчеты. Автоматизация контроля должна включать проверку размещения переходных отверстий (особенно это актуально при моделировании многослойных печатных плат с переходными отверстиями сложной формы).

Для этого надо разработать метод проектирования трехмерного ПУ, в том числе выбрать оптимальный способ представления трехмерной модели ПУ.

### Метод проектирования трехмерного ПУ

Пространственная (трехмерная) модель ПУ включает трехмерный конструктив платы, проводники и трехмерные модели ЭК, а также трехмерные модели деталей для ЭК (радиаторов, прокладок и т.д.) и трехмерные ограничительные зоны.

Конструирование ПУ включает два основных этапа: размещение ЭК на плате и трассировку проводников. Размещение ЭК на плате необходимо выполнять в трехмерном изображении, чтобы контролировать установку компонентов друг под другом. Кроме того, установив ограничительные (запретные) зоны в соответствии с формой корпуса (или секции, или др.), можно контролировать возможность установки в корпус высоких ЭК (как правило, навесных). Трассировку проводников удобнее выполнять в двухмерном изображении ПУ, при этом модель ПУ должна оставаться трехмерной. Можно предположить, что проводники достаточно описать в модели ПУ плоскостями (т.е. двухмерно), так как высота проводников незначительна (обычно 18 мкм) по сравнению с высотой ЭК.

ЭК представляет собой трехмерное изображение корпуса компонента и контактных площадок (рис. 2). Контактная площадка для компонента навесного монтажа (компонента со штыревыми выводами) состоит из отверстия и металлизации внутри отверстия и на поверхности платы (вокруг отверстия). Для формирования трехмерной модели посадочного места под навесной ЭК контактная площадка должна включать описание отверстия и металлизации на поверхности платы. Металлизацию внутри отверстия в САПР ПУ обычно задают посредством опции (в PCAD это опция «Plated»). Металлизацию на поверх-

ности платы, видимо, тоже можно описать плоскостью (как и проводники). Отверстие для вывода ЭК формируется в модели ПУ, а на этапе создания компонента задается только его диаметр. Планарная контактная площадка (для ЭК поверхностного монтажа) представляет собой металлизированную площадку, как правило, прямоугольной формы, которая тоже может быть описана плоскостью.

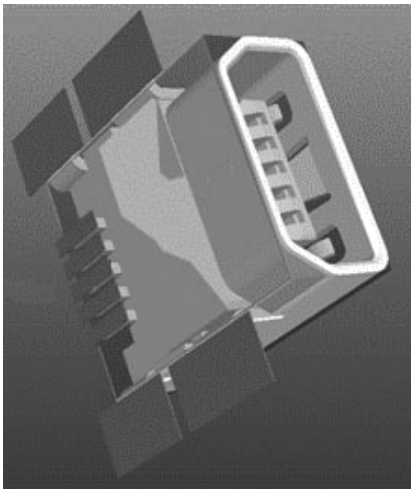


Рис. 2. Трехмерная модель разъема с контактными площадками

Вся информация в слоях металлизации ПП (проводники, металлизированные полигоны, планарные контактные площадки, металлизация вокруг отверстий для выводов навесных ЭК и переходных отверстий) может быть представлена двухмерно – плоскостями.

Детали для ЭК рекомендуется создавать в том же программном модуле, что и конструктив ПП, т.е. в редакторе топологии ПП. Детали для ЭК заносятся в библиотеку и могут использоваться в других проектах. Маршрут проектирования трехмерного печатного узла представлен на рис. 3.

На основе анализа способов представления моделей геометрических объектов при конструкторско-технологическом проектировании ПУ предлагается использовать объемное моделирование посредством сплошных конструктивов (твердотельное моделирование). Математическая модель сплошных конструктивов представляет собой список ребер, т.е. грань выражается через ребра:

$F = \{(e_{j1}, e_{j2}, ..., e_{jk}, [f_j(\upsilon, \nu)])\}$, при $k \geq 3$,

где $e_k = (\nu_i, \nu_j, [f_k(u)])$ – ребро, в котором $f_k$ – уравнение линии (если линия не прямая), а $V = \{\nu_1, \nu_2, ..., \nu_n\}$ – вершины; $f_j$ – функция грани (если грань не плоская).

Основными преимуществами применения твердотельного моделирования (в сравнении с каркасным и поверхностным моделированием) при проектировании ПУ являются:

- возможность создания точных моделей (полное однозначное описание трехмерной геометрической формы);
- обеспечение автоматического удаления скрытых линий;
- автоматическое построение разрезов компонентов;
- применение перспективных методов анализа с автоматическим получением изображения точных весовых характеристик и эффективных конструкций методом конечных элементов;
- повышение эффективности имитации динамики механизмов (например, процедур генерации траектории движения инструмента).

В предлагаемой трехмерной модели ПУ возможен автоматизированный анализ электромагнитной совместимости во всех слоях, так как конструктив платы трехмерный.

В связи с тем, что средства управления (кнопки, переключатели) и средства индикации (светодиоды, жидкокристаллические индикаторы) располагаются, как правило, на передней панели, а разъемы – на задней или боковых, в некоторых случаях возникает электромагнитная несовместимость ПУ (если несовместимые по электромагнитным характеристикам проводники тянутся через всю плату и находятся в недопустимой близости друг с другом). В таких случаях компоненты переразмещают на плате, либо некоторые подузлы с одного ПУ переносят на другой. Во втором случае компоновка модулей изменяется. Этот фактор довольно сложно предугадать на начальном этапе компоновки ЭУ.

Алгоритмы компоновки основаны на минимизации количества связей между частями электронного устройства. Для построения формальной математической модели компоновочных задач при проектировании ЭУ используется теория графов [4]. При этом электрическая схема интерпретируется ненаправленным мультиграфом, в котором каждому конструктивному элементу (модулю) ставится в соответствие вершина мультиграфа, а электрическим связям схемы – его ребра. Тогда задача компоновки формулируется следующим образом: задан мультиграф $G(X,U)$, который требуется «разрезать» на отдельные куски

$G_1(X_1,U_1)$, $G_2(X_2,U_2)$,…, $G_k(X_k,U_k)$ так, чтобы число ребер, соединяющих эти куски, было минимальным, т.е. минимизировать сумму

$$\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{k}U_{ij},$$

где $i \neq j$; $U_{ij}$ – множество ребер, соединяющих куски $G_i(X_i,U_i)$ и $G_j(X_j,U_j)$.

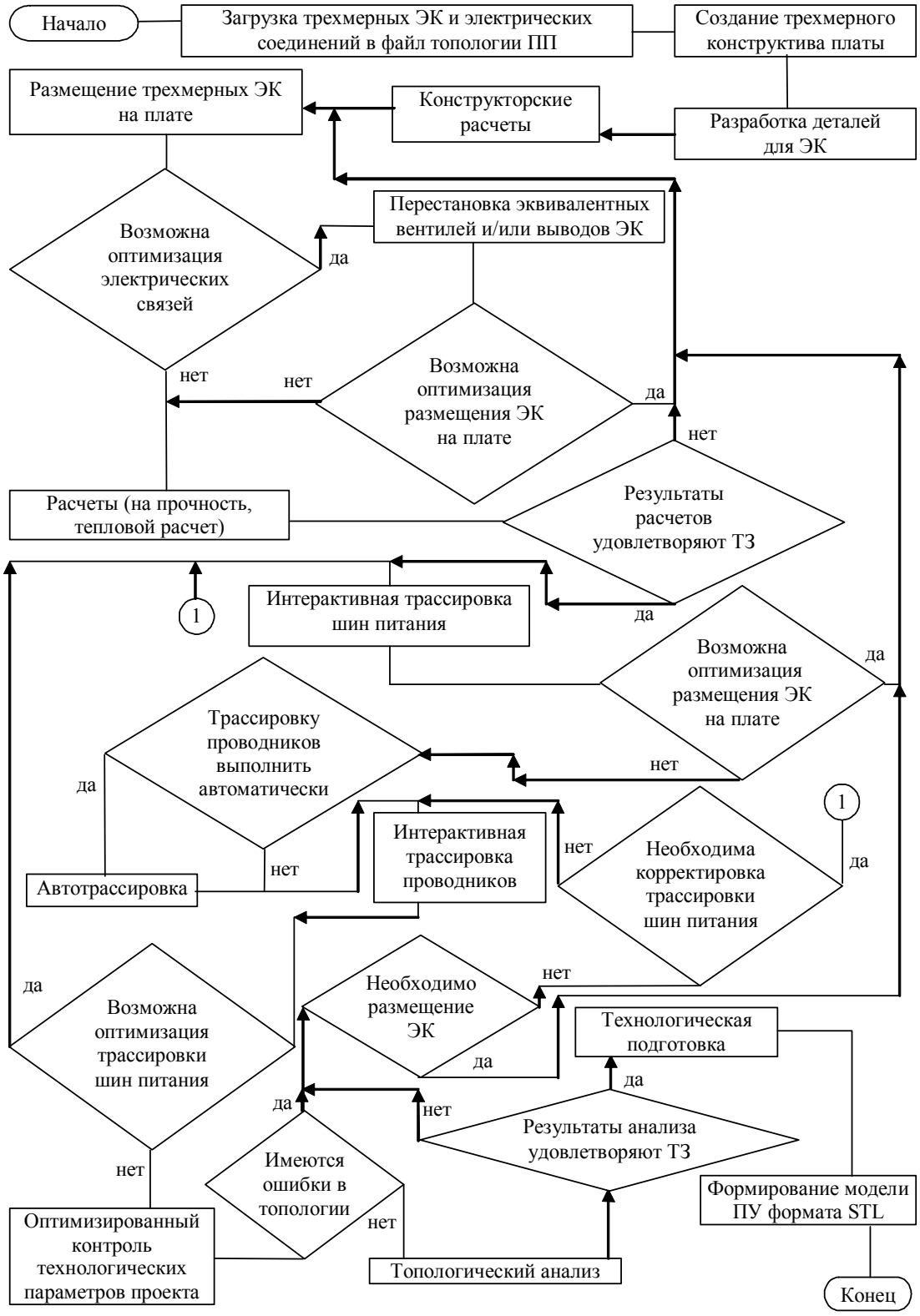



Рис. 3. Маршрут проектирования трехмерного печатного узла

Сумму множества ребер $U_{ij}$ необходимо минимизировать соблюдая два условия:

$$\forall G_i(X_i,U_i), G_j(X_j,U_j) \in G(X,U)[G_i(X_i,U_i) \neq G_j(X_j,U_j) \Rightarrow (X_i \cap X_j = \varnothing \,\&\, U_i \cap U_j = U_{ij})],$$

$$\bigcup_{i=1}^{k} G_i(X_i,U_i) = G(X,U),$$

где $i, j = 1, 2, \ldots, k$.

В связи с вышеизложенным для трехмерной модели ПУ предлагается оптимизировать существующие алгоритмы компоновки, а именно, добавить предварительный автоматизированный анализ электромагнитной совместимости в части разбитого графа $G_i(X_i,U_i)$ и оптимизацию графа $G_i(X_i,U_i)$ по критерию электромагнитной совместимости.

Последовательность этапов предварительного автоматизированного анализа электромагнитной совместимости ПУ представлена на рис. 4. При этом размещение на плате ЭК, таких как средства управления, средства индикации и разъемы, выполняют вручную, а остальные ЭК размещают автоматически; автотрассировку проводников выполняют с установленными конструктивными параметрами, в том числе такими, как ширина проводников и зазоры. Авторазмещение и автотрассировку можно выполнить, например, в программе SPECCTRA. Автоматизированный анализ электромагнитной совместимости можно выполнить, например, в системе трехмерного электромагнитного моделирования многослойных печатных плат Simbeor.

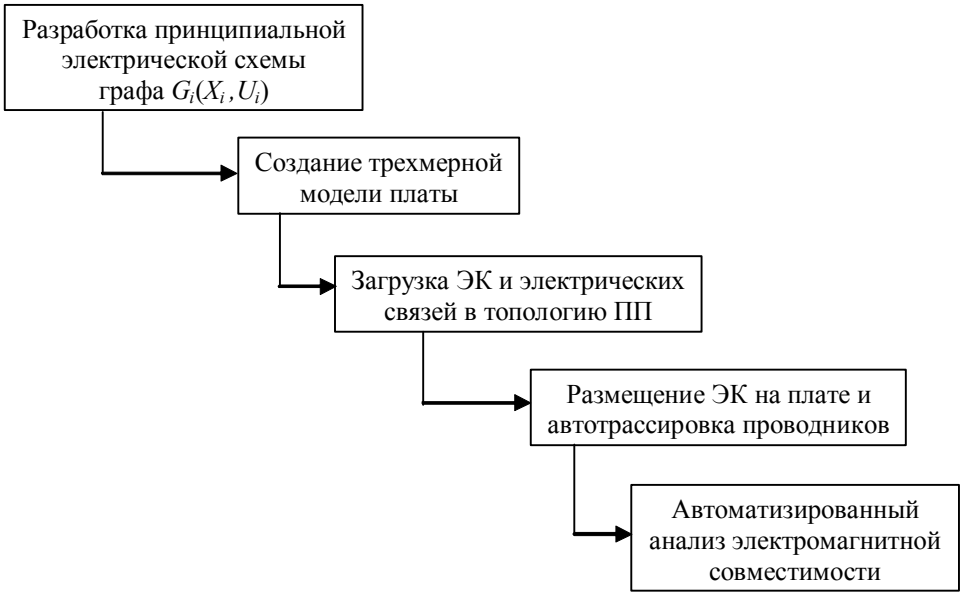



Рис. 4. Последовательность этапов предварительного автоматизированного анализа электромагнитной совместимости ПУ

Для оптимизации графа по критерию электромагнитной совместимости можно использовать веса вершин графа, назначенные по электромагнитным критериям, и посредством перестановки вершин графа перераспределить модули.

При этом необходимо понимать, что предварительный автоматизированный анализ электромагнитной совместимости ПУ необходим лишь в тех узлах, в которых имеются высокочастотные сигналы, или когда узел представляет собой смешанную (аналогово-цифровую) схему, или если в одном узле сосредоточены сигналы с сильно различающимися напряжениями (например, 5 В и 220 В). В таких узлах ЭК размещают вручную, а трассировку производят интерактивно, и выполнение предложенного алгоритма немного увеличит время проектирования ПУ за счет выполнения авторазмещения, автотрассировки и автоматизированного анализа электромагнитной совместимости, но позволит значительно сэкономить время, если реализация графа $G_i(X_i,U_i)$ невозможна на одном ПУ.

**Заключение**

Трехмерная модель печатного узла, представленная сплошными конструктивами в редакторе топологии плат (с трехмерным конструктивом платы и с формированием трехмерных ограничительных зон), позволит автоматизировать инженерные расчеты, контроль размещения переходных отверстий и контроль электромагнитной совместимости во всех слоях. Автоматизация процессов проектирования печатного узла позволит повысить эффективность САПР ПУ, а также сократить сроки конструкторско-технологического проектирования ЭУ и увеличить качество ЭУ.

Автоматизированные процессы проектирования ПУ рекомендуется выполнять во встроенной CAE-системе.

Предложенный метод проектирования трехмерного ПУ может быть использован для оптимизации существующих САПР ПУ и разработки новой САПР ПУ, а также при решении таких задач, как сквозное проектирование ЭУ в едином информационном пространстве и при формировании прототипов деталей и конструкций ЭУ.

**Литература**

1. Bao Z. Rechnerunterstützte Kollisionsprüfung auf der Basis eines B-rep/Polytree/ CSG-Hybridmodells in einem integrierten CAD/CAM-System. – Düsseldorf: VDI Verlag, 2000. – 187 с.
2. Gatchin Y.A., Romanova E.B., Korobeynikova M.A. RP-technologies in designing the radio-electronic equipment. Proceedings of the International Scientific Conferences «Intelligent Systems (IEEE AIS'04)» and «Intelligent CAD's (CAD-2004)». Scientific publication in 3 vollumes. – Moscow: Physmathlit, 2004. – V. 3. – P. 127–128.
3. Арустамов С.А., Гатчин Ю.А., Романова Е.Б. Анализ функциональных возможностей САПР PCAD-2006 на основе опыта ее эксплуатации // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 59. – С. 113–119.
4. Курейчик В.М. Математическое обеспечение конструкторского и технологического проектирования с применением САПР: Учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.

***Кузнецова Ольга Валерьевна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, olunchik_1989@mail.ru

***Романова Ева Борисовна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, eva_rom@mail.ru

# 7 МЕТОДЫ И СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.005

## МИНИМИЗАЦИЯ РИСКОВ ПОТЕРИ ДОСТУПНОСТИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОСЛЕ УСТАНОВКИ ОБНОВЛЕНИЙ ИЛИ ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ

**С.А. Арустамов, М.Г. Генин**

Дается описание стратегии обновления информационных систем на основе понятия простого обновления. Проводится сравнительный анализ процесса обновления при использовании стратегии простых обновлений и без использования данной стратегии. На основе этого доказывается обоснованность такого способа обновления для снижения риска сбоя системы после проведенного обновления. Приводится пример, подтверждающий эффективность данного подхода.

**Ключевые слова:** информационные системы, обновление, управление обновлениями, стратегия обновления, простое обновление, вероятность успеха, риск сбоя.

### Введение

Вопросами управления обновлениями (или изменениями) информационных систем занимаются достаточно давно, им посвящено много публикаций. Одна из первых работ датируется 1980 г. и принадлежит фирме IBM [1]. В ней впервые управление изменениями рассматривается не как отдельная дисциплина, а как составная часть управления информационными системами. С тех пор эта область знаний сильно расширилась, были предложены различные подходы к управлению изменениями, однако этот основополагающий принцип в силе и по сегодняшний день. В настоящее время процесс управления изменениями обычно связывают с методологией ITIL [2]. Наряду с ITIL, существуют и другие методологии, посвященные управлению изменениями в информационных системах, например, COBIT [3], Microsoft Operational Framework [4]. В 2005 г. был разработан международный стандарт ISO/EIC 20000 [5], который объединил все эти методологии в одну общую концепцию управления процессами в информационные технологии (ИТ), в том числе и управления изменениями.

Тем не менее, несмотря на достаточно большое количество разработанных подходов и методик, все они являются в значительной степени организационными и носят формальный характер. В них предлагаются процедуры планирования, утверждения, реализации и контроля за выполнением изменений в системе, обсуждаются вопросы организации взаимодействия руководства, бизнес-подразделений и подразделений ИТ при выполнении тех или иных действий, распределяются роли и зоны ответственности сотрудников. Но все эти процедуры являются внешними по отношению собственно к процессу обновления, они не дают ответа на вопрос о том, как нужно проводить обновление систем наиболее безопасным образом, чтобы риск возникновения внештатных ситуаций при этом был минимальным.

В настоящей статье обсуждаются риски, связанные с обновлением систем, а также предлагаются некоторые способы снижения этих рисков.

Рассматриваются ситуации, при которых установка обновления носит императивный (обязательный) характер. При этом риски отказа от установки как вероятностная категория отсутствуют, а последствиями отказа являются детерминированные ущербы (отзыв лицензии на ведение бизнеса, прекращение поддержки предыдущей версии, нарушение вновь вводимой корпоративной политики, штрафы, накладываемые надзорными органами, или другие негативные последствия).

### Снижение риска сбоя системы при использовании стратегии простых обновлений

Под большой системой будем понимать систему, состоящую из большого числа модулей и взаимосвязей между ними. Обновление таких систем представляет собой нетривиальную задачу и связано со следующими проблемами.

- Высокий риск возникновения неполадок после установки обновления в продукцию даже при условии выполнения всех требований по тестированию и процедуре миграции. Это связано с тем, что во многих случаях бывает слишком сложно или практически невозможно полностью смоделировать работу продукционной системы вместе с ее окружением во время тестирования. Например, крайне сложно смоделировать подключение тысяч пользователей или взаимодействие с внешними поставщиками услуг при параллельной работе продукционной системы.
- Невозможность возврата к предыдущей версии без потерь времени и (или) данных, т.е. возврат либо требует очень много времени, либо выполняется сравнительно быстро, но с потерей данных. Проблемы могут выявляться не только в момент запуска системы после обновления, но и в течение некоторого времени после начала работы, когда данные уже изменились по сравнению с теми, которые были в момент запуска. При принятии решения о возврате к предыдущей версии системы сохранение новых данных может оказаться невозможным.

Предлагаемый подход к обновлению систем основан на том предположении, что риск возникновения проблем есть всегда и он в принципе не может быть устранен. Представляется возможным лишь снизить последствия возникновения рисковых ситуаций. Для этого, в свою очередь, нужно определиться с тем, какие рисковые ситуации для нас приемлемы, а какие – нет. Применительно к обновлениям программного обеспечения это можно переформулировать более строго следующим образом: нужно определиться с максимально допустимым временем либо для исправления ошибки, которая может возникнуть после установки того или иного обновления, либо для возврата к предыдущему состоянию системы, т.е. до обновления. Затем при установке обновлений нужно придерживаться этих допустимых параметров, другими словами, единовременно устанавливать только такие обновления, которые возможно откатить или исправить за допустимое время без потерь данных.

Для этого нужно определиться с максимально допустимым временем возврата, а затем попытаться разбить планируемое обновление на несколько таких простых обновлений, откат каждого из которых в отдельности возможен за допустимый интервал времени. Устанавливать каждое такое простое обновление нужно отдельно, в определенной последовательности.

После всего сказанного, можно сформулировать следующие условия, которым должно удовлетворять каждое простое обновление в составе большого обновления:

- в определенный момент времени устанавливается только одно простое обновление;
- после успешной установки каждого «простого» обновления система работоспособна;
- в случае возникновения проблем после установки простого обновления возврат к предыдущей конфигурации происходит за допустимый интервал времени и либо не приводит к потере данных вообще, либо приводит лишь к минимальной потере данных, связанных с новым функционалом.

Покажем, что последовательная установка полного обновления, используя принцип его разбиения на простые обновления, удовлетворяющие вышеприведенным условиям, более безопасна, чем установка всего обновления сразу.

**Определение.** Будем называть обновление $u_i$ *простым*, если возможен процесс возврата за допустимое время к предыдущему состоянию системы по прошествии некоторого времени после установки обновления $u_i$. Если $u_i$ прошло успешно, то система работоспособна и готова к установке обновления $u_{i+1}$.

Будем исходить из того, что любое полное обновление $U$ может быть представлено в виде суммы некоторого количества простых обновлений $u_i$, $i$=1,..., $N$:

$U = u_1 + u_2 + ... + u_N$.

**Утверждение.** Последовательная установка простых обновлений $u_i$, $i$=1,..., $N$ в составе обновления $U$ безопаснее, чем установка всего обновления $U$ сразу.

**Доказательство.** Исходим из того, что после установки любого $u_i$ система работоспособна, поэтому есть выбор: либо выделить время и установить все обновление $U$ целиком, либо поэтапно устанавливать каждое $u_i$, после чего делать паузу и давать возможность системе поработать некоторое время, затем устанавливать $u_{i+1}$ и т.д.

Обозначим $p(u_i)$ – вероятность успешной установки обновления $u_i$. Рассчитаем теперь вероятность успешной установки $P(U)$ всего полного обновления в том и в другом случае.

Рассмотрим случай установки всего обновления сразу. Если все обновление $U$ состоит из одного простого обновления $u_1$**,** можем записать:

$P(U)=p(u_1)$.

Для обновления, состоящего уже из двух простых обновлений $u_1$ и $u_2$, формула будет выглядеть как произведение вероятностей

$P(U)=p(u_1)\cdot p(u_2)$,

так как успех всего обновления возможен только при успехе обновлений $u_1$ и $u_2$ .

Соответственно, для $N$ обновлений формула будет выглядеть следующим образом:

$$P(U) = p(u_1) \cdot p(u_2) \cdot ... \cdot p(u_N) = \prod p(u_i),\ i=1,\ldots,N. \quad (1)$$

Поскольку любая $p(u_i)$ меньше единицы, то можно утверждать, что $P(U) < p(u_i)$ для любого $i$. Отсюда вытекает, что при одновременной установке всех простых обновлений $u_i$ в составе обновления $U$ вероятность успешного исхода $P(U)$ всегда ниже, чем при единовременной установке только одного обновления $u_i$.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда обновления $u_i$ в составе обновления $U$ устанавливаются не одновременно, а через определенные промежутки времени, между которыми система работает (можно так сделать, так как по требованиям после установки каждого $u_i$ система работоспособна). Для этого заметим, что установка обновления $u_i$ производится только после того, как обновление $u_{i-1}$ уже было успешно установлено, и после этого система некоторое время проработала.

Посмотрим, как ведет себя вероятность $p(u_i)$ при таком способе обновления. Вообще говоря, пока что авторы не касались вопроса о том, как определить вероятность $p(u_i)$. Вопрос этот очень сложный, и пока не хотелось бы подробно его рассматривать. Однако можно сделать некоторые предположения о том, от чего она зависит и как на нее повлиять. Например, можно утверждать, что в первые моменты после запуска обновленной системы вероятность сбоя выше, чем в последующие. Как правило, большинст-

во проблем после обновления возникает в течение первого сеанса работы. Если первый сеанс проблем не выявил, то вероятность того, что они возникнут позднее, существенно ниже. Таким образом, можно утверждать, что после установки обновления $u_i$ с течением времени вероятность его успеха $p(u_i)$ будет возрастать и в предельном случае стремиться к единице. На рис. 1 вероятность $p(u_i)$ представлена графически как функция времени.

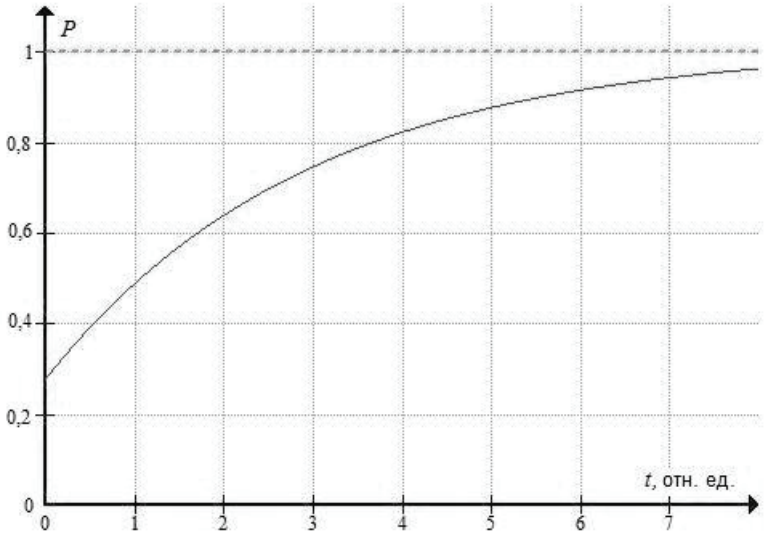



Рис. 1. Зависимость вероятности успеха обновления от времени

Здесь момент времени, равный нулю, соответствует ситуации запуска системы сразу после обновления $u_i$, а момент времени $T$ – состоянию, когда система уже проработала некоторое время после обновления. Чем больше система проработала после установки $i$-го обновления, тем меньше шансов, что из-за него возникнет сбой. Если между каждым обновлением $u_1, u_2, ..., u_{i-1}$ проходит достаточное количество времени, то вероятности успеха этих уже установленных обновлений $p(u_1),\ldots, p(u_{i-1})$ близки к единице (рис. 2).

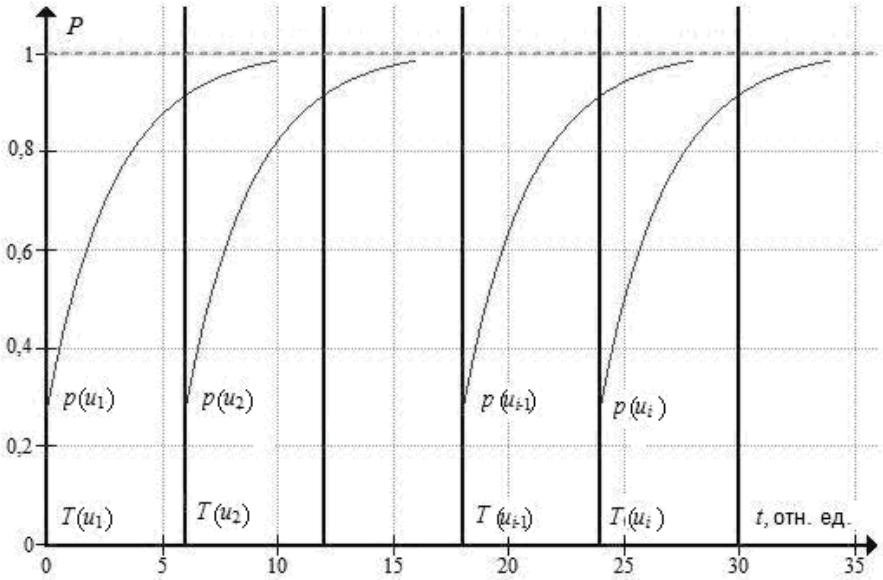



Рис. 2. Вероятности успеха для уже установленных обновлений

Обозначим $P(u_i)$ – вероятность успеха всех обновлений системы с первого по $i$-е при последовательной их установке. По аналогии с (1) можем записать:

$P(u_i) = p(u_1) \cdot p(u_2) \cdot \ldots \cdot p(u_i) = \prod p(u_j),\ j=1, \ldots, i.$

Учитывая, что $p(u_1), \ldots, p(u_{i-1})$ в случае последовательной установки близки к единице при установке $i$-го обновления, можем приближенно записать, что

$P(u_i) \approx p(u_i).$

Таким образом, можем принять, что при последовательной установке обновлений $u_1, u_2, \ldots, u_i$ вероятность успеха всех этих обновлений равна вероятности успеха последнего, $i$-го обновления. Действительно, все предыдущие обновления уже установлены ранее и после каждого обновления система уже проработала некоторое время.

Напомним, что при одновременной установке всех обновлений вероятность $p(u_i)$ успеха каждого из них от первого до последнего не стремится к единице, а имеет начальное значение для момента времени ноль, а, следовательно, вносит свой негативный вклад в общую вероятность $P(U)$. Как следует из (1), вероятность $P(U)$ успеха всех обновлений $u_i$, установленных разом, существенно ниже вероятности $P(u_i)$ успеха при последовательной установке обновлений с $u_1$ по $u_i$, и так вплоть до последнего $u_N$. Таким образом, можно записать, что

$$P(U) < P(u_i)$$

для любого $i$ от единицы до $N$. Следовательно, при выполнении требования о работоспособности системы при установке любого из простых обновлений в составе полного обновления вероятность успешного исхода выше именно при последовательной, растянутой во времени установке обновлений. При одновременной установке сразу всех простых обновлений риск сбоя существенно возрастает.

**Ограничения по времени обновления и их влияние на риск сбоя**

В приведенных выше рассуждениях авторы не касались того, до какой степени нужно разбивать полное обновление на простые обновления, его составляющие. Исходя из сделанных выводов, получается, что чем на более мелкие части разбито обновление, тем более безопасна его последовательная установка. С другой стороны, при последовательной установке между каждыми следующими друг за другом простыми обновлениями система должна поработать, должно пройти время. Следовательно, при более мелком разбиении время установки всего полного обновления также будет расти, так как шагов (т.е. простых обновлений) будет больше. Если предположить, что промежуток времени между соседними обновлениями примерно один и тот же, то время, которое система должна проработать в *продукции*, при установке всего полного обновления $U$ будет таким:

$$T(U) = T_c \cdot N + \sum T(u_i),\ i=1, \ldots, N,$$

где $T_c$ – время работы системы между соседними простыми обновлениями; $N$ – количество простых обновлений $u_i$, составляющим $U$, а $T(u_i)$ – время установки $i$-го обновления.

Если считать, что установка обновлений $u_i$ проводится во внерабочее время и (или) что время установки каждого $u_i$ мало по сравнению со временем $T_c$ работы системы между простыми обновлениями, то время установки $T(u_i)$ каждого $i$-го простого обновления можно не учитывать и второе слагаемое в формуле опустить:

$$T(U) \approx T_c \cdot N. \qquad (2)$$

Таким образом, можно приближенно считать, что время установки всего полного обновления $U$ прямо пропорционально количеству простых обновлений. При отсутствии необходимости уложиться в определенное время при обновлении системы можно на этом остановиться и проводить последовательные обновления в комфортном режиме, т.е. дробить полное обновление на желаемое количество частей и устанавливать эти части одну за другой с подходящим расстоянием во времени. Если обновление в целом достаточно масштабное, то его установка в таком комфортном режиме установки может сильно затянуться.

Рассмотрим теперь ситуацию, когда время ограничено и необходимо уложиться в определенные рамки. В этом случае необходимо повлиять на время $T(U)$, т.е. сократить его. Согласно (2) это можно сделать двумя способами: уменьшая время работы системы $T_c$ между простыми обновлениями и сокращая количество простых обновлений в составе полного.

Посмотрим, что будет происходить, если начнем сокращать время между соседними обновлениями. Для этого обратимся к рис. 1, 2, где изображены зависимости вероятности успеха установки обновления от времени, которое проработала система с момента установки. Из него следует, что вероятность успеха тем выше, чем больше времени прошло. Соответственно, при сокращении времени между обновлениями вероятность успеха каждого простого обновления снижается (рис. 3).

Рассмотрим теперь второй из возможных вариантов: сокращение количества простых обновлений. По сути дела, это означает, что за один раз устанавливается не одно обновление $u_i$, а сразу несколько простых обновлений от $u_{i-k}$ до $u_i$. В этом случае вероятность успеха установки этих нескольких обновлений в одном пакете будет равна произведению вероятностей успеха каждого из обновлений:

$$P(u_{i-k}, \ldots, u_i) = p(u_{i-k}) \cdot p(u_{i-k+1}) \cdot \ldots \cdot p(u_i).$$

Так как любая $p(u_i)$ меньше единицы, то в соответствии с (1) можно сделать вывод, что вероятность успешной одновременной установки нескольких обновлений ниже вероятности установки каждого обновления отдельно.

Рассмотрев оба варианта сокращения времени, приходим к выводу, что сократить время установки обновления можно только за счет повышения риска сбоя системы. Повышенный риск, в свою очередь, может быть либо следствием сокращения времени работы системы между простыми обновлениями, либо следствием установки нескольких простых обновлений сразу (причем второй вариант сводится к первому, так как при этом время между этими обновлениями сокращается до нуля). На рис. 4 изображены оба варианта.

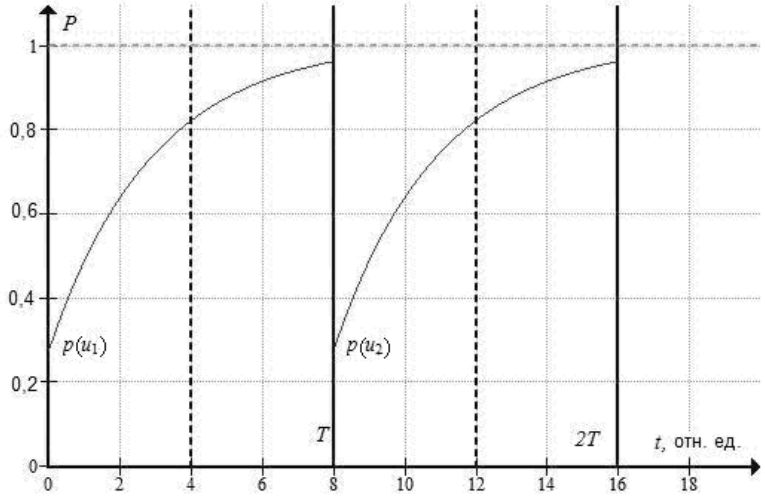



Рис. 3. Влияние сокращения времени между соседними обновлениями на их вероятности успеха

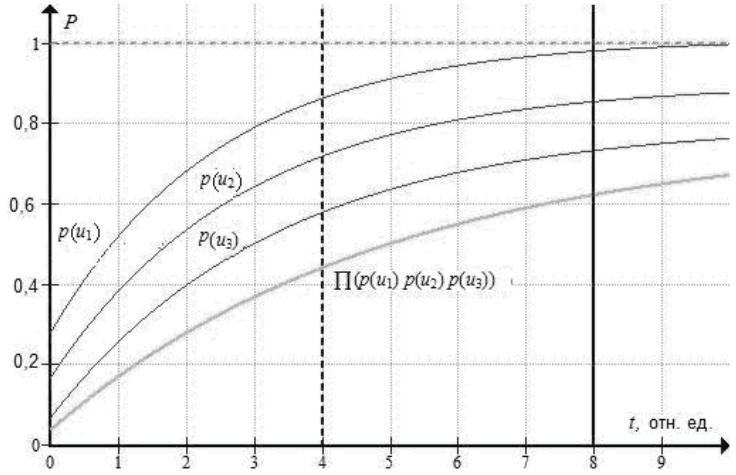



Рис. 4. Вероятность успеха при одновременной установке нескольких обновлений

**Тестирование предложенной методики**

Для апробации предложенной методики было выбрано финансово-кредитное учреждение (ФКУ) с головным отделением в Санкт-Петербурге и филиалом в Москве. Особенностью выбранного ФКУ является большая нагрузка на московский филиал за счет сосредоточения в нем большей части сотрудников и клиентов. В каждом из офисов есть набор серверов, работающих под ОС Microsoft Windows 2003, в том числе сервер сетевой печати, который используется сотрудниками каждого из офисов.

После получения обновлений (приблизительно 30) с сайта компании Microsoft было принято решение об их установке на серверы в обоих филиалах. Проведенное предварительное тестирование на тестовых серверах подтвердило работоспособность серверов и корректное выполнение всех заявленных функций, в том числе и функции сервиса печати. По результатам тестирования было решено проводить обновление поэтапно, сервер за сервером, сначала в офисе в Санкт-Петербурге, а затем в Московском филиале.

На следующий день после окончания установки всех обновлений на рабочие серверы в офисе в Санкт-Петербурге все заявленные функции выполнялись корректно. По истечении недели после успешно проведенного обновления в Санкт-Петербургском офисе обновление провели в Московском филиале.

В середине следующего дня после установления обновлений в Московском филиале на сервере печати возникли неполадки. Они проявлялись в том, что отправленные на печать документы не распечатывались на соответствующих принтерах. При этом задания корректно отображались в очереди на печать каждого из подключенных устройств, но ни удалить то или иное задание, ни полностью очистить очередь печати не представлялось возможным. Выключение и включение принтеров тоже не давало никаких результатов. Помогал только перезапуск сервиса печати (spooler), однако это давало лишь временное облегчение, так как по мере накопления документов в очереди на печать ситуация повторялась. Кроме того, при перезапуске сервиса печати часть заданий, уже отправленных на печать, терялась.

Ввиду критичности данного сервиса было принято решение восстановить из резервной копии образ сервера печати на момент до установки этих обновлений. Так как проблема на тестовом окружении не воспроизводилась, было решено устанавливать по одному обновлению в день на рабочий сервер печати, а на следующий день наблюдать за ситуацией. Действуя таким образом, только на седьмой день удалось определить обновление, которое вызывало описанные проблемы с печатью. Это обновление было удалено, задержка по времени была минимальной, и после этого сервер печати стал корректно выполнять свои функции.

В дальнейшем причина такого поведения сервиса печати при установке данного обновления была установлена. Как было сказано в инструкции, прилагавшейся к данному обновлению, оно устраняло критическую проблему в системе безопасности и очень рекомендовалось к установке. В ходе более подробного изучения материалов из базы знаний Microsoft выяснилось, что данное обновление исправляло ошибку в одной из системных библиотек, которую использует в своей работе сервис печати. При этом изменилось значение по умолчанию одного из параметров, который влияет на обработку заданий на печать. Было установлено, что для корректного функционирования сервиса печати при том количестве принтеров и объеме документов, которые печатались в московском офисе, необходимо предварительно установить большее, чем по умолчанию, значение для данного параметра в конфигурации сервиса печати, а уже затем устанавливать данное обновление. В Санкт-Петербургском офисе проблема не проявилась, так как объем печати там существенно меньше и новое значение по умолчанию соответствовало нагрузке на сервис печати.

### Заключение

В работе введено понятие простого обновления, рассмотрена стратегия обновления на основе использования простых обновлений, проведен анализ вероятности успеха обновления системы без использования стратегии простых обновлений и с использованием данной стратегии, доказано, что при использовании стратегии простых обновлений риск сбоя системы снижается, приведен пример, иллюстрирующий данный подход.

### Литература

1. IBM (1980). A Management System for the Information Business. White Plains. – New York: IBM.
2. Information Technology Infrastructure Library, Wikipedia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/ITIL, свободный. Яз. англ. (дата обращения 19.02.2011).
3. COBIT, Wikipedia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/COBIT#COBIT_and_ISO.2FIEC_27002:2007, свободный. Яз. англ. (дата обращения 19.02.2011).
4. Microsoft Operations Framework, Wikipedia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Microsoft_Operations_Framework, свободный. Яз. англ. (дата обращения 19.02.2011).
5. ISO/IEC 20000, Wikipedia [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/ISO/IEC_20000, свободный. Яз. англ. (дата обращения 19.02.2011).

***Арустамов Сергей Аркадьевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, arustamov@gmail.com

***Генин Михаил Геннадьевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, gmg@rambler.ru

**УДК 654.924**

# ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ КОНЦЕПЦИИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ

**В.В. Волхонский**

На основе общего подхода к проблеме обеспечения безопасности анализируются основные угрозы и риски для защищаемых объектов. Сформулированы общие принципы построения объединенных интегрированных систем обеспечения безопасности объектов и перечень исходной информации, необходимой для разработки таких систем, а также рассмотрены вопросы оценки прямой и косвенной экономической эффективности системы.
**Ключевые слова**: угрозы, риски, безопасность, интегрированная система.

### Введение

Одним из важнейших вопросов при построении системы безопасности (СБ) является разработка концепции обеспечения безопасности, определяющая все основные характеристики разрабатываемой СБ. В большинстве публикаций задача разработки такой концепции привязана либо к конкретному типу обо-

рудования, либо к конкретному объекту. Это априорно снижает функциональные возможности разрабатываемой системы и увеличивает риски. Кроме того, зачастую разработка систем ведется вообще без разработки концепции и детального анализа возможных угроз, а только на основе типового решения с определенными функциональными возможностями. Это приводит к тому, что не учитывается целый ряд угроз и возможных потерь для объекта. В работе предпринята попытка сформулировать в общем виде основные положения концепции обеспечения безопасности, применимые для различных объектов и оборудования разных производителей. На основе анализа формулируются базовые требования к объединенным интегрированным системам безопасности (ОИСБ), решающим задачу обеспечения безопасности в широком смысле.

**Основные понятия и определения**

Общее понятие безопасности, жизненно важных интересов и объектов безопасности определено в Законе РФ [1]. Более узкие понятия противокриминальной и антитеррористической охраны и безопасности определены в Национальном стандарте РФ [2].

В работе предлагается общий подход к проблеме построения СБ, охватывающий не только вопросы противокриминальной и антитеррористической охраны и безопасности, но и многие другие стороны обеспечения безопасности в самом широком смысле. Иначе говоря, рассмотрены не только традиционные направления обеспечения безопасности, включающие средства охранной и пожарной сигнализации, ТВ наблюдения, контроля и управления доступом, но другие направления. К последним можно отнести системы жизнеобеспечения зданий и сооружений (кондиционирование, вентиляция, отопление и др.); энергосбережение, т.е. анализ потребляемых ресурсов (холодная и горячая вода, электроэнергия, газ и т.д.); мониторинг местоположения на объекте персонала, важного имущества, средств транспорта и т.п.; контроль работоспособности технологического оборудования, а также и любые другие направления так или иначе связанные с безопасностью. Упомянутые направления в настоящее время контролируются, как правило, независимо от «традиционных» СБ. Усложнение криминогенной обстановки и, в первую очередь, рост террористической угрозы требуют более общего единого подхода. Связь упомянутых направлений непосредственно с безопасностью достаточно очевидна. К примеру, состояние воздушной среды (обычно контролируемое системой инженерных коммуникаций здания или вообще не контролируемое) непосредственно влияет на безопасность находящихся в этом здании людей. Надо также понимать, что угрозы могут быть не только прямыми, но и опосредованными. А опосредованные угрозы зачастую легче реализовать, если не предусмотрены их обнаружение и соответствующая реакция на них СБ. Например, искусственное задымление в системе вентиляции здания, где проводятся массовые мероприятия, может привести к давке с очень серьезными последствиями. Общий подход должен предусматриваться не только на этапе разработки структуры СБ, но и на всех остальных этапах, начиная от анализа угроз и заканчивая обслуживанием и модернизацией системы.

С этой точки зрения в работе будут использоваться следующие более общие понятия. Субъект или объект обеспечения безопасности (СООБ) – жизнь, здоровье, окружающая среда, имущество и информация. Безопасность – состояние защищенности СООБ от различных угроз. Система безопасности (СБ) – совокупность методов и средств предупреждения, обнаружения, противодействия развитию и ликвидации угроз жизни, здоровью, окружающей среде, имуществу и информации. Угроза – факторы (события, действия, процессы и т.п.), приводящие к возможности возникновения ситуации, при которой происходит нарушение состояния защищенности СООБ. Риск – возможность реализации угрозы, приводящей к тому или иному уровню потерь (ущерба) для СООБ.

Перечень угроз для задачи построения противокриминальной и антитеррористической СБ, как правило, включает такие угрозы, как пожар, кража, нападение, терроризм, вандализм, несанкционированный доступ. Однако с безопасностью в широком смысле связаны и многие другие угрозы, например, утечка воды или жидкостей, приводящих к материальным потерям; утечка газов (непосредственно создающих угрозу СООБ или приводящих к возникновению других угроз, например, пожара или взрыва); ухудшение состояния воздушной среды (недопустимый уровень загрязнения или изменения температурного режима и т.п.); неисправность технологического оборудования, создающая угрозы; угрозы, создаваемые для СООБ самой ОИСБ, например, средствами автоматизированного пожаротушения; человеческий фактор (защита «от дурака», подкуп или запугивание, паническое поведение толпы и т.п.), а также многое другое. Задача обнаружения и ликвидации таких угроз может и должна решаться в единой системе. Очевидно, что решение проблемы обеспечения безопасности в широком смысле возможно только при использовании именно ОИСБ, включающей как технические и программные средства «традиционных» направлений обеспечения безопасности, так и другие, реализующие защищенность от перечисленных выше угроз.

Таким образом, только комплексное решение всех вопросов единой ОИСБ позволит обеспечить максимальную эффективность системы с точки зрения обнаружения различных угроз и своевременную реакцию на ту или иную угрозу.

Эффективность ОИСБ будет также зависеть и от ряда других вопросов. Например, разработка структуры системы и состава оборудования без учета вопросов эксплуатации в дальнейшем может сни-

жать не только экономическую эффективность СБ, но и функциональную. Необходим также единый подход и на всех этапах создания и эксплуатации ОИСБ.

### Угрозы и риски

Анализ, выполняемый на основе полного перечня угроз и учитывающий оценки вероятностей реализации угроз и возможного ущерба от их реализации, позволяет составить перечень реальных (с высокой вероятностью реализации) и существенных (приводящих к существенным потерям) угроз, учитываемых при разработке ОИСБ.

Естественно, при этом должны приниматься во внимание все возможные ограничения, в частности, экономические, юридические (законодательные), организационные, технические и другие, в той или иной степени важные в решаемой задаче.

Упомянутые выше угрозы могут при необходимости группироваться в такие основные категории, как криминальные, террористические, техногенные, природные, субъективные и др. Такая группировка может позволить правильно составить полный перечень возможных угроз. При этом надо понимать, что некоторые угрозы могут входить в часть или во все группы. Например, пожар может возникнуть как результат поджога (криминал или терроризм), неисправности электропроводки или оборудования (техника), небрежности человека (субъект) или молнии (природное явление). В связи с этим также необходимо конкретизировать возможные способы реализации каждой угрозы.

Можно говорить о следующих основных видах рисков: реализации угроз, возникновения потерь для СООБ при реализации угрозы и безнаказанности выполнения несанкционированных действий, а также о рисках, связанных непосредственно с процессом разработки и реализации самой ОИСБ [3, 4] и, в конечном итоге, влияющих на безопасность собственно СООБ – технический (возможность отказа СБ); непредсказуемый (непредсказуемое развитие ситуации); осознанный (сознательный отказ от обеспечения безопасности того или иного приоритета); заданный (взятый за основу возможный риск и уровень последствий реализации угроз) и системный (связанный с угрозами, создаваемыми СБ при ее функционировании и во внештатных ситуациях).

### Общие принципы построения СБ

Разработка концепции построения объединенных интегрированных систем безопасности может основываться на следующих базовых принципах.

- Решение задачи обеспечения безопасности объекта в широком смысле, с учетом всех составляющих, необходимых для эффективного обеспечения противокриминальной, антитеррористической, антивандальной, технологической, информационной, экономической, экологической и других направлений обеспечения безопасности субъекта или объекта, необходимых в каждой конкретной задаче. В ряде случаев упомянутые составляющие могут перекрываться, например, противокриминальная защита также решает часть вопросов антитеррористической и информационной безопасности. Однако в разных случаях конечная цель преступника, методы его действий и используемые им средства могут существенно отличаться и, как следствие, требовать различных средств и методов обеспечения безопасности. Например, цель кражи (материальная выгода) достигается, если преступник не только достиг цели, но и вышел за пределы досягаемости сил реагирования. Если он был задержан на месте совершения кражи или даже после нее, то потери, как правило, минимальны и приемлемы. Однако террористу-смертнику этого не требуется – достижение им цели уже позволяет реализовать теракт, и потери могут быть катастрофические.
- Реализация полностью интегрированного решения упомянутых выше задач в комплексе на всех этапах построения системы: анализа объекта и всех его особенностей; анализа всех возможных угроз, оценки вероятности их реализации и возможных потерь при реализации и составления списка реальных угроз; проектирования системы; монтажа оборудования; пусконаладочных работ; обучения персонала СБ на начальном этапе и поддержания уровня квалификации в процессе эксплуатации; обучения персонала объекта; обслуживания системы в процессе эксплуатации; модернизации СБ (программного обеспечения и оборудования, расширения СБ и т.д.).
- Учет, по возможности, всех реальных угроз (прямых, опосредованных, первичных, вторичных), приводящих к существенным потерям для СООБ.
- Оценка вероятности реализации угроз и возможных потерь от реализации угроз, а также уровней допустимых потерь.
- Оценка рисков и возможных потерь от реализации самой ОИСБ.
- Решение упомянутых выше задач в оптимальном, соответствующем задаче и требованиям заказчика смысле. Иначе говоря, наиболее эффективном с функциональной, экономической, технической, вероятностной и других точек зрения.

– Разработка комплекса организационных мероприятий по реагированию на нештатные ситуации персонала службы безопасности и самого объекта.

### Основные исходные данные

Очевидно, что в каждой конкретной задаче список исходных данных будет различаться и зависеть от особенностей объекта и режима его функционирования. Однако в общем случае исходные данные могут быть следующие.

– Общая структура объекта, включающая в себя: перечень групп объектов или комплексов, входящих в состав объекта обеспечения безопасности и территориально разнесенных между собой (например, комплекс спортивных сооружений – горнолыжный комплекс, стадион, каток и т.д.); состав и функциональное назначение объектов в каждой группе; конструктивные особенности каждого объекта. Территориальное расположение объектов на местности с учетом особенностей рельефа, растительности, других близлежащих объектов и коммуникаций; наличие и характеристики водных объектов (море, озеро, каналы, водоводы, речки и т.п.), находящихся в непосредственном контакте с ООБ, т.е. пересекающие объект или граничащие с ним; социальные, этнические и религиозные особенности региона.
– Транспортная инфраструктура объекта, включающая следующие основные элементы: каждодневные способы доставки персонала и посетителей в эти группы объектов (железнодорожный, автомобильный транспорт и т.д.; с разделением по персоналу, посетителям и обслуживанием) из мест их нахождения (например, спортсменов из олимпийской деревни, зрителей из мест проживания); разовые способы транспортировки персонала и посетителей на период различных массовых мероприятий, непосредственно перед мероприятием и после; количество постоянно находящихся на объекте жителей, персонала фирм и т.п.; ориентировочное каждодневное количество посетителей (максимальное, изменение количества во времени и в календарные периоды и т.д.).
– Основные средства жизнеобеспечения этих объектов (кабельные или воздушные ЛЭП, каналы поставки продуктов, воды, теплоснабжения и т.п.).
– Каналы связи, которые используются непосредственно для целей обеспечения режима функционирования объектов, их защищенность, возможности их использования для СБ, возможность использования специальных каналов связи для СБ и т.п.
– Материалы уже имеющиеся в распоряжении заказчика, такие как следующие: технические требования к системе и ее элементам; организационные требования к режиму работы системы; ведомственные и иные требования к ОИСБ; анализ угроз, рисков и уязвимостей, уже сделанный заказчиком.
– Ограничения на зону ответственности разработчиков ОИСБ, в частности, необходимость учета таких задач, как обеспечение безопасности от подготовки терактов на этапе строительства; защиты информации, в частности, каналов связи; защита средств жизнеобеспечения этих объектов, расположенных вне самих объектов; контроль поставок продуктов питания, напитков и т.п.; обеспечение безопасности водных акваторий (над- и подводных); обеспечение безопасности воздушного пространства; обеспечение режима безопасности на окружающей территории и господствующих высотах и т.п.

Ясно, что невозможно учесть заранее все особенности объектов. В связи с этим в каждом конкретном случае вышеприведенный перечень может расширяться и дополняться в зависимости от поставленных требований и ограничений.

### Основные требования к системе безопасности

ОИСБ должна строиться на основе общих базовых принципов, изложенных выше. Непрекращающаяся дискуссия о том, какая из подсистем безопасности должна быть основой для интегрированной системы безопасности, вряд ли имеет серьезный смысл. Она продиктована главным образом желанием производителя продвинуть именно свое оборудование и программные средства. В каждом конкретном случае решение должно приниматься в зависимости от поставленной задачи. Если наиболее важными являются функции, к примеру, охранной сигнализации, то и брать за основу обычно лучше программное обеспечение этой подсистемы. Но главный принцип построения ОИСБ – единая общая платформа интеграции всех подсистем, необходимых для решения задачи обеспечения комплексной безопасности конкретного объекта с возможностью в дальнейшем эффективных модернизации и развития программного и аппаратного обеспечения системы. Это обеспечивается предъявлением следующих основных требований к ОИСБ.

*Проектные*

– Обоснованность всех используемых подсистем и элементов разрабатываемой ИСБ.
– Адекватность структуры, состава и стоимости системы угрозам, рискам и возможным потерям.
– Соответствие требованиям государственных стандартов и ведомственных документов.

*Структурные*

– Многоуровневая архитектура обнаружения угроз и принятия решения.

- Программная и аппаратная масштабируемость системы.
- Программная и аппаратная модульность построения системы.
- Пространственно-распределенная архитектура.
- Централизованное и децентрализованное управление подсистемами.

*Функциональные*

- Решение задач предупреждения угроз (поддержание безопасного состояния).
- Многофункциональность подсистем (возможность выполнения подсистемами не только своих основных функций, но и части функций других подсистем).
- Обнаружение угроз с учетом требований максимально раннего обнаружения (по возможности, на этапе подготовительных или начальных действий) и максимально надежного обнаружения за счет использования высоконадежных средств обнаружения; соответствия их принципов обнаружения характеру проявления угроз; обнаружения одних и тех же угроз на основе различных физических принципов обнаружения; обнаружения одних и тех же угроз разными подсистемами для повышения вероятности обнаружения системой в целом; интегрального принятия решения на основе использования комплекса информации от устройств обнаружения всех подсистем.
- Самодиагностика и самоконтроль ОИСБ с автоматическим выявлением не только и самих неисправностей, но и возможности их возникновения.
- Защищенность самой СБ от несанкционированных действий, таких как маскирование и блокирование средств обнаружения угроз, вскрытия элементов системы, нарушения каналов связи, съема информации о системе, попыток несанкционированного изменения ее параметров и т.п. действий.
- Инвариантность СБ к изменениям окружающей среды и условий взаимодействия с другими элементами объекта и самой системы.
- Резервирование всех основных жизненно важных элементов системы.
- Инвариантность к типу каналов связи и возможность их дублирования с использованием различных физических принципов действия.

*Организационные*

- Возможность своевременного и максимально эффективного реагирования на угрозу для минимизации возможных потерь.
- Возможность высокой степени адаптации (аппаратной, программной, организационной, функциональной) к особенностям объекта и режиму его функционирования.
- Открытость для использования оборудования и программных средств различных производителей оборудования.

*Информационные*

- Высокая информативность устройств обнаружения угроз.
- Высокая степень автоматизации процессов обработки информации и принятия решения в системе для снижения влияния человеческого фактора.
- Применение типовых протоколов обмена (LonWorks, BACnet, OPC, …).
- Интеграция с приложениями, используемыми на объекте (PeopleSoft, SAP, …).

Кроме того, с точки зрения непосредственно режима функционирования ОИСБ должна удовлетворять основным требованиям, сформулированным в работе [3].

**Эффективность системы**

Комплексный подход к разработке ОИСБ подразумевает также и комплексный подход к оценке затрат на создание и эксплуатацию системы, т.е. учет стоимости всех этапов построения СБ (анализ объекта, проектирование, поставка оборудования, монтаж, пуско-наладка, обучение персонала, обслуживание, расширение, модернизация). Это позволяет минимизировать затраты в комплексе при достижении максимальной эффективности работы системы в целом. Очевидно, что в общем случае должны учитываться различные стороны эффективности:

- функциональная (возможность решения всех поставленных задач обеспечения комплексной безопасности объекта);
- техническая (надежная система с эффективным использованием своих ресурсов);
- экономическая, включающая в себя следующее:
  - прямую эффективность, т.е. экономию на содержании и обучении персонала службы безопасности; за счет минимизации количества персонала СБ (операторов, обслуживающего персонала, ...); путем энергосбережения (рационального использования различных ресурсов, расходуемых объектом обеспечения безопасности, таких как электроэнергия, вода, газ, пар, топливо и т.п.); за счет максимально рационального использования служб реагирования (благодаря уменьшению количества ложных тревог в системе); на уменьшении эксплуатационных расходов на систему; на снижении расходов на модернизацию системы; на снижении расходов на расширение системы (как аппаратное, так и функциональное); уменьшение страховых взносов и выплат;

– косвенную эффективность, обеспечиваемую за счет таких показателей, как оптимизация отношения цена/качество; уменьшение уровня рисков; возможность получения всех видов услуг из одних рук; достижение максимальной непрерывности бизнеса и, как следствие, обеспечение репутации надежной компании; удобство модернизации СБ за счет совместимости оборудования и программных средств; удобство количественного и функционального расширения СБ за счет гибкой структуры платформы интеграции; повышение уровня автоматизации обработки информации; повышение удобства обслуживания; обеспечение интеграции с другими подсистемами предприятия; обеспечение многофункциональности системы; обеспечение эффективной интеграции и взаимодействия различных подсистем; реализация единого управления всеми подсистемами; обеспечение оптимального рабочего климата для достижения максимальной производительности труда; минимизация количества нештатных ситуаций, влияющих на непрерывность бизнеса (за счет предупреждения, раннего обнаружения и проверки правильности обнаружения нештатной ситуации); минимизация последствий (потерь) от нештатных ситуаций.

Различные способы оценки того или иного вида эффективности приведены в ряде опубликованных работ, например, в [4].

## Заключение

На основе представленного подхода были разработаны концепции обеспечения безопасности и реализованы системы безопасности для различных по сложности и функциональным особенностям государственных и коммерческих объектов в Российской Федерации и странах СНГ. Предложенный подход является достаточно общим и позволяет на его основе в каждом конкретном случае эффективно решить конкретную задачу. Эффективность реализации изложенной концепции подтверждается длительным успешным опытом эксплуатации упомянутых СБ.

## Литература

1. Закон Российской Федерации от 5 марта 1992 г. №2446-1 «О безопасности» (в редакции 07.03.2005).
2. ГОСТ Р 52551-2006. Национальный стандарт Российской Федерации. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 2006.
3. Соломанидин Г.Г. Предложение услуг безопасности // Междунар .науч. конф. «Информатизация правоохранительных систем». Сб. тр. – М., 2001. – С. 87–89.
4. Волхонский В.В. Системы охранной сигнализации. – 2-е изд., доп. и перераб. – СПб: Экополис и культура. – 2005. – 204 с.

***Волхонский Владимир Владимирович*** – ЗАО «Хоневелл», кандидат технических наук, доцент, руководитель направления систем безопасности, volkhonski@mail.ru

# 8 НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

**УДК 004.046, 004.055, 004.056.2**

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ШКОЛЫ

**Д.А. Варенников, Г.В. Лукьянова**

Описывается автоматизированная система для физико-математической школы СПбГУ ИТМО. Рассмотрен функционал системы, который направлен на повышение качества организации учебного процесса. Приведено обоснование необходимости такой системы, а также отмечено преимущество данной системы перед аналогами.
**Ключевые слова:** автоматизированная система, физико-математическая школа, СУБД, Интернет, электронный журнал, обмен сообщениями, расписание занятий.

### Введение

В век развития информационных технологий школьники и их родители активно пользуются Интернет -ресурсами, и это средство информации необходимо использовать в полной мере. Эффективность образовательного процесса во многом зависит не только от качества преподавания, но и от своевременной информированности родителей об успеваемости ученика.

Целью работы являлась разработка автоматизированной системы для физико-математической школы (АС ФМШ) СПбГУ ИТМО.

Проведя информационно-аналитический обзор уже существующих аналогов «Электронный журнал» [1] и «Дневник» [2], можно сделать следующий вывод: каждая из этих систем имеет стандартный набор функций, который может подойти многим среднеобразовательным школам.

Заявленные функции системы «Электронный журнал» – оценки, посещаемость, ведение журнала, журнал в Интернете, контакт с детьми и родителями, расписание, статистика и отчетность [3].

Заявленные функции системы «Дневник» – расписание уроков, электронный журнал, электронный дневник, домашние задания, библиотека художественной литературы, личные страницы, друзья, сообщения, тематические группы и события, общение между школами, обмен данными [2].

Каждая школа уникальна и имеет свои требования к таким системам. В приведенных системах нет ряда важных для ФМШ функций, таких как:
- электронная подача заявок на обучение;
- электронная обработка договоров;
- автоматическое формирование групп учащихся;
- дальнейшее целенаправленное развитие системы без подстройки под другие школы.

Учитывая достоинства существующих аналогов, «Электронный журнал» и «Дневник», а также необходимый дополнительный функционал для ФМШ, была разработана система АС ФМШ. Электронный журнал ФМШ позволяет родителям ежедневно контролировать успеваемость своего ребенка. Обмен сообщениями в системе упрощает взаимное общение родителей и учеников с преподавателями и администрацией школы. АС ФМШ дает преимущество не только ученикам и их родителям, но и администрации школы, которая сможет работать с электронными договорами, выставлять результаты вступительных испытаний, создавать новости и расписание занятий, выводить различного вида отчеты.

### Программная реализация

Для достижения поставленных целей была выбрана система управления базой данных (СУБД) Oracle. Это обусловлено тем, что Oracle постоянно разрабатывает и улучшает наиболее надежную систему управления базами данных в течение долгих лет. С данной точки зрения СУБД является головным проектом базовых технологий Oracle, демонстрируя свое превосходство перед другими известными системами баз данных. Можно выделить следующие характеристики:
- лидерство по производительности;
- самоуправляемость;
- конкурентные цены;
- поддержка коммерческих приложений;
- проверенная масштабируемость;
- улучшенная безопасность;
- аналитические функции;
- гибкость работы [4].

Для создания системы были использованы следующие языки программирования: PHP (язык программирования для WEB с открытым исходным кодом, система поддержки которого совместима со все-

ми основными типами веб-серверов [5]); JavaScript; SQL (SQL является стандартным языком, который признан Национальным институтом стандартизации США (ANSI)) [6]; HTML. Преимущество языка PHP обусловлено пятью важными характеристиками – традиционностью, простотой, эффективностью, безопасностью, гибкостью [7].

### Принцип работы АС ФМШ

Разделим работу на 4 этапа:

1. подача заявки на обучение учеником или родителем;
2. прохождение вступительного испытания;
3. заключение договора;
4. обучение.

Данные этапы характерны не только для ФМШ, но и для других школ. Возможно варьирование требований к этим этапам для разных школ, в зависимости от их уклона. Внесение изменений в систему в зависимости от требований конкретной школы не вызывает трудностей, так как система АС ФМШ разработана таким образом, что ее функции представляют собой отдельные модули. Удобство такого подхода заключается в том, что функции можно легко добавлять, изменять и, при необходимости, удалять. Модуль представляет собой отдельный файл, в котором содержится код программы необходимой функции. Для добавления конкретного модуля в системе прописывается на него ссылка. Каждый модуль можно разделить на подмодули. Из вышесказанного следует, что внесение изменения в отдельные модули не предполагает каких-либо сложностей или необходимости изменения всей системы. АС ФМШ можно настроить под нужды любой школы. На рисунке представлена ER-диаграмма АС ФМШ.

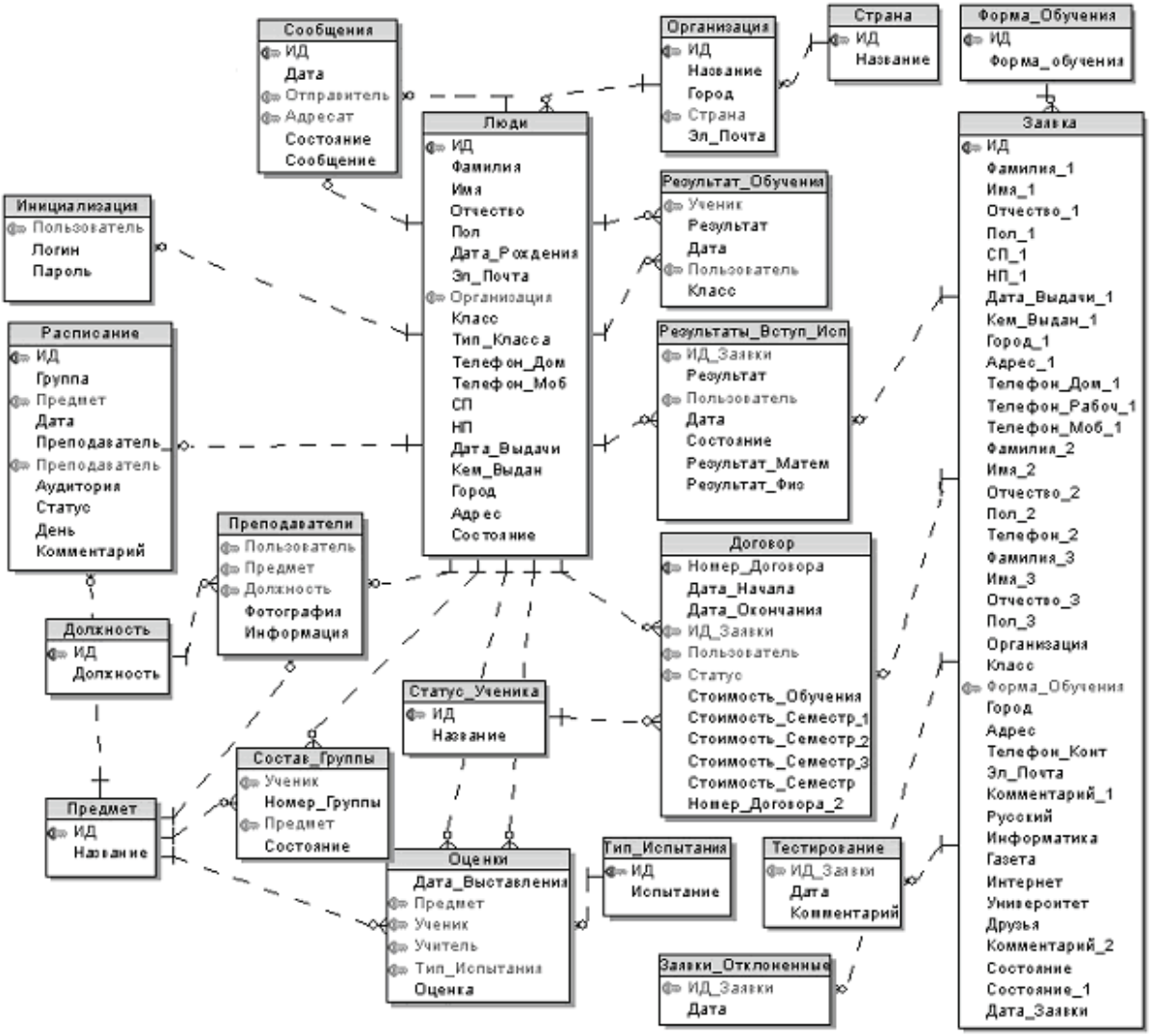



Рисунок. ER-диаграмма АС ФМШ

### Функции системы

**Пользователи системы.** В АС ФМШ существует разграничение прав пользователей, необходимое для предоставления определенного набора доступных для использования функций системы. В АС ФМШ определены следующие группы безопасности:

- «Гость»;
- «Ученик»;
- «Преподаватель»;
- «Модератор»;
- «Администратор».

К категории «Гость» относится лицо, не зарегистрированное в системе и имеющее доступ к чтению общедоступной (открытой) информации. К категории «Ученик» относится лицо, зарегистрированное в системе, обладающее ограниченными правами доступа к функциям системы. К категории «Преподаватель» относится лицо, зарегистрированное в системе, обладающее расширенными правами доступа к функциям системы. К категории «Модератор» относится лицо, представляющее администрацию школы и обладающее полномочиями на запрос к любой информации, в том числе и закрытой. К категории «Администратор» относится лицо, осуществляющее обслуживание системы и обеспечивающее контроль целостности данных.

Зарегистрированные пользователи АС ФМШ получают всю необходимую информацию в зависимости от категории пользователя. Важно, что, в отличие от подобных систем, в АС ФМШ ученик получает доступ к просмотру только своих оценок, а не ко всему списку учеников из своей учебной группы.

**Запись в ФМШ.** Для записи в ФМШ необходимо обратиться на главную страницу АС ФМШ и перейти в раздел «Запись в ФМШ». Запись в ФМШ осуществляется по следующим этапам:

- подача заявки на обучение в школе;
- назначение даты вступительного испытания;
- прохождение вступительного испытания;
- заключение договора;
- создание паролей ученикам;
- распределение по учебным группам.

**Управление договорами.** Раздел «Договора» доступен для пользователей с группой безопасности «Модератор» или «Администратор». Данный раздел позволяет выполнять следующие операции:

- создавать договор;
- вносить изменения в существующий договор;
- выводить краткую информацию по всем договорам.

Электронная обработка договоров значительно упрощает работу администрации школы. Данная функция дает возможность своевременно выявлять должников и позволяет оперативно применять административные меры.

**Обмен сообщениями.** В АС ФМШ реализован обмен сообщениями между зарегистрированными пользователями, что позволяет администрации школы делать массовые рассылки как всем пользователям, так и отдельным учебным группам. Функция «Обмен сообщениями» позволяет избежать попадания информационного сообщения из массовой рассылки в «спам» и гарантирует моментальную доставку сообщения адресату, а также позволяет отслеживать прочтение сообщений, что помогает избежать недоразумений. Данная функция снимает барьер «ученик–преподаватель».

**Электронный журнал.** В системе всем зарегистрированным пользователям предоставлен доступ к разделу «Электронный журнал». Пользователь с группой безопасности «Администратор», «Модератор» или «Преподаватель» имеет возможность выставлять, редактировать и просматривать оценки учеников. Для удобства пользования при выставлении оценок на экране появляется календарь. Пользователь с группой безопасности «Преподаватель» может выставлять оценки только по тому предмету, который он ведет. Пользователи с группой безопасности «Администратор» или «Модератор» имеют возможность не только просматривать оценки всей учебной группы по выбранному предмету, но и выбрать конкретного ученика и получить всю интересующую по нему информацию, а также могут добавлять и редактировать типы испытаний, за которые в дальнейшем выставляются оценки.

Преподаватель может выставлять оценки по различным видам испытаний за занятие в удобной для себя системе. Электронный журнал позволяет родителям контролировать успеваемость учеников, администрации школы – вести статистику успеваемости учеников, выявлять неуспевающих и оповещать родителей.

**Редактор пользователей.** Раздел «Редактор пользователей» доступен пользователю с группой безопасности «Администратор» или «Модератор» и позволяет выполнять следующие операции:

- создавать пользователей системы;
- создавать логины и пароли для учеников;
- распределять учеников по группам;

- выводить списки пользователей системы;
- выводить списки учеников по учебным группам;
- осуществлять поиск ученика по фамилии.

**Расписание.** Для всех зарегистрированных пользователей системы доступен раздел «Расписание», который предназначен для информирования пользователей о расписании занятий и расписании экзаменов. Пользователь с группой безопасности «Ученик» или «Преподаватель» имеет возможность получить краткую информацию о преподавателе, ведущем занятие или проводящем экзамен. Пользователь с группой безопасности «Администратор» или «Модератор» имеет возможность добавлять, редактировать или удалять расписание. При создании расписания обязательно указывается преподаватель, предмет, аудитория и время проведения занятия или экзамена.

**Новости.** В системе всем пользователям предоставляется доступ к разделу «Новости», который предназначен для ознакомления с новостями. Последняя новость всегда выводится на главной странице системы. Архив новостей доступен для просмотра по ссылке «Просмотреть все новости». Пользователь с группой безопасности «Администратор» или «Модератор» имеет возможность добавлять, редактировать или удалять новость.

**Форумы.** Раздел «Форумы» позволяет задать вопрос автору форума, поделиться с другими участниками полезной или интересной информацией или ответить на вопросы, заданные другими пользователями. Не рекомендуется добавлять сообщения, имеющие частный характер. Для этих целей следует использовать внутрисистемную почту в разделе «Обмен сообщения». Пользователь имеет право создавать, вести свои форумы, а также участвовать в форумах, пользователем которых он является. Для просмотра списка доступных форумов необходимо выбрать в меню слева на странице системы раздел «Форумы». Отобразится список форумов, доступных пользователю в данный момент времени.

**Отчет.** Раздел доступен для пользователей с группой безопасности «Модератор» или «Администратор». Здесь можно выводить необходимые данные, для вывода данных необходимо отметить галочкой ту таблицу, которую необходимо вывести, и нажать кнопку «Далее», после чего выведется отчет.

## Заключение

Была разработана автоматизированная система для физико-математической школы СПбГУ ИТМО (http://de.ifmo.ru/fizmat/). Система обладает следующими достоинствами:

- упрощена процедура работы с договорами;
- электронный журнал позволяет родителям контролировать успеваемость учеников и упрощает работу с оценками для преподавателей;
- имеется возможность индивидуального общения между пользователями системы;
- повышено удобство работы с расписанием.

Апробация системы проводилась с 2009 года в физико-математической школе СПбГУ ИТМО. В апробации приняли участие 1030 человек: администрация школы, преподаватели, родители, учащиеся. В ходе апробации выявлялись «слабые» недоработанные места системы, которые оперативно устранялись благодаря гибкости системы. С 2010 г. система полностью внедрена в учебный процесс физико-математической школы СПбГУ ИТМО. По мнению всех участников апробации, система удобна и проста в управлении. Администрация положительно отметила возможности адаптации системы под новые задачи и требования.

Разработанная система позволяет повысить качество организации образовательного процесса. Система является многофункциональной, гибкой, не требует специального программного обеспечения, что позволяет внедрять ее в другие учебные заведения.

## Литература

1. Электронный журнал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eljur.ru, своб.
2. Дневник.ру – школьная социальная сеть [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://dnevnik.ru, своб.
3. Электронный журнал [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eljur.ru/pdf/eljur_present.pdf, своб.
4. Почему стоит выбирать Oracle [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.oracle.com/global/ru/partner/isv/mysql/index.html, свободный. – Загл. с экрана.
5. Конверс Т., Парк Дж., Морган К. PHP5 и MySQL. Библия пользователя: Пер. с англ. – М.: Вильямс, 2006. – 1216 с.
6. Прайс Дж. SQL для Oracle 10g: Пер. с англ. – М.: Лори, 2007. – 567 с.
7. Преимущество PHP [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://php.su/php/?opport , своб.

***Варенников Денис Анатольевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, vardenis@inbox.ru

***Лукьянова Галина Владимировна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, зав. аспирантурой, gal-lou@yandex.ru

УДК 004.942

# РАЗРАБОТКА СТЕНДА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТИПОВЫХ СХЕМ РАЗВЕРТЫВАНИЯ СИСТЕМЫ ACADEMICNT

**А.А. Скшидлевский, А.В. Лямин**

Описывается стенд для проведения экспериментальных исследований типовых схем развертывания системы дистанционного обучения AcademicNT. Стенд основан на технологии виртуализации с целью упрощения механизмов развертывания и проведения экспериментов, повышения эффективности работы со стендом и минимизации затрат. На основе данных, полученных при экспериментальных исследованиях, строятся имитационные модели системы дистанционного обучения для последующего расчета мощности необходимых аппаратных ресурсов при функционировании системы с заданной нагрузкой.

**Ключевые слова:** технология виртуализации, моделирование, имитационная модель.

## Введение

На этапе планирования развертывания многопользовательского программного обеспечения существует известная проблема, когда, располагая какой-то системой, невозможно дать обоснованную оценку производительности данной системы в конкретных условиях проведения испытаний этой системы на конечном оборудовании в реальных условиях. Для решения задачи оценки производительности такой системы была предложена методика расчета на основе имитационного моделирования [1], а также проведено исследование поведения испытуемых при проведении педагогических измерений и разработана соответствующая математическая модель [2]. В настоящей работе предлагается подход, дополняющий предыдущие исследования и предоставляющий инструменты для получения необходимых данных для реализации имитационных моделей систем дистанционного обучения.

## Типовые схемы развертывания

В качестве основы для исследований взята система дистанционного обучения (СДО) AcademicNT, разработанная в СПбГУ ИТМО [3, 4]. Есть несколько типовых схем развертывания этой системы как внутри одной сети, так и на территориально распределенных узлах. В качестве примера рассмотрим схему, изображенную на рис. 1.

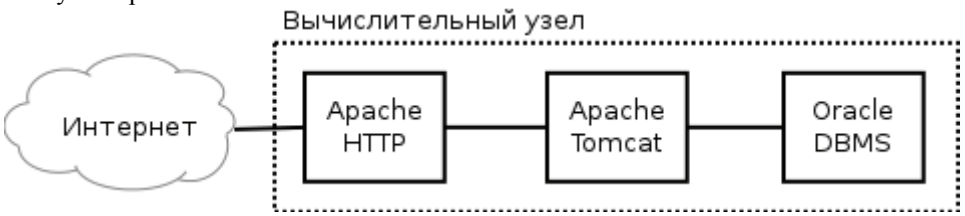



Рис. 1. Типовая схема развертывания СДО AcademicNT

Эта схема представляет собой один узел вычислительного кластера в локальной сети, где отдельные элементы, такие как веб-серверы Apache HTTP, Apache Tomcat и система управления базой данных (СУБД) Oracle, взаимодействуют друг с другом, создавая единую отказоустойчивый структуру.

## Имитационные модели

Каждый элемент этой схемы можно представить в виде модели, представляющей элементарное звено обработки запросов. Объединяя такие звенья в соответствии со схемой развертывания системы, получим модель, изображенную на рис. 2.

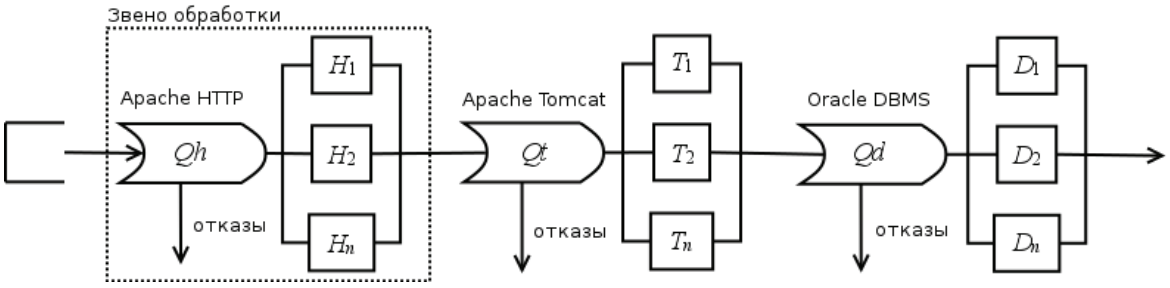



Рис. 2. Модель типовой схемы развертывания СДО AcademicNT

Основными входными параметрами такой модели являются генератор входного потока запросов и показатели среднего времени обработки запросов каждым элементом модели. На основе результатов апробации, проведенной в рамках исследования поведения испытуемых при проведении педагогических

измерений, были получены распределения вероятностей для запросов к системе вовремя аттестаций. Эти исследования легли в основу генератора входного потока запросов. В модели буквами $H_1$, $H_2$, ..., $H_n$; $T_1$, $T_2$, ..., $T_n$; $D_1$, $D_2$, ..., $D_n$ обозначаются устройства обработки запросов, а *Qh*, *Qt*, *Qd* – очереди.

**Виртуализация и экспериментальный стенд**

Для определения входных параметров модели при использовании различных схем развертывания было решено разработать экспериментальный стенд. Для повышения эффективности и гибкости разработки, а также минимизации затрат используется технология виртуализации. Эта технология позволяет на одном сервере одновременно запускать множество виртуальных систем, изолировать их друг от друга, распределять ресурсы между ними, создавать виртуальные сети и управлять этими виртуальными системами. На рис. 3 изображена общая схема виртуализации, где на одном сервере запускаются несколько виртуальных машин. В качестве монитора виртуальных машин было решено использовать гипервизор с открытым исходным кодом Xen, поддерживаемый компанией Citrix и распространяемый по лицензии GPL-2. Именно открытость исходных кодов позволила в полной мере использовать технологию виртуализации для реализации механизмов сбора и анализа статистической информации. Гипервизор Xen устанавливается поверх операционной системы GNU/Linux.

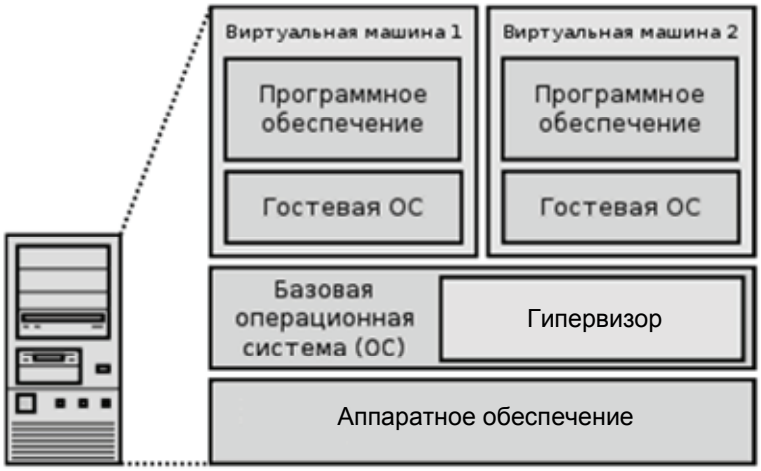



Рис. 3. Общая схема виртуализации с применением гипервизора

На виртуальных машинах можно реализовать любую необходимую схему развертывания системы, в данном случае используются виртуальные машины с веб-серверами Apache HTTP, Apache Tomcat и СУБД Oracle. Ключевыми компонентами данной схемы являются генератор запросов и агрегатор.

Генератор запросов представляет собой виртуальную систему, генерирующую запросы по заранее составленному сценарию. Сценарий представляет собой набор ссылок и переходов, которые бы выполнял реальный пользователь. При генерации запросов учитывается распределения вероятностей, полученные при апробации. Соответственно, есть возможность изменять интенсивность запросов.

Агрегатор представляет собой систему, собирающую статистику по функционированию реализованной схемы. Собирается статистика об объеме используемой оперативной памяти, использованию процессора и объеме передачи данных по сети, а также сохраняется дамп сетевого трафика для последующего анализа. На основе полученного дампа рассчитываются входные параметры для модели. Каждый элемент схемы порождает трафик особой структуры, что дает возможность точно сказать, какому элементу принадлежит тот или иной запрос. Каждый промежуточный запрос имеет временную метку. На рис. 4 проиллюстрированы этапы обработки запроса в СДО AcademicNT. К примеру, если запрос направляется сначала к веб-серверу Apache HTTP, после чего отправляется на веб-сервер Apache Tomcat, а затем сервлеты СДО AcademicNT взаимодействуют с базой данных, то в рамках одного запроса полное время обработки будет суммой всех временных затрат на каждом элементе данной схемы взаимодействия. Именно это время обработки может определить клиент, отправивший запрос. Но для использования в модели необходимо определить время обработки запроса, затраченное каждым отдельным элементом схемы. Эта задача решается с помощью идентификации фрагментов трафика и временных меток.

Таким образом, определяем переменные $T_1$, $T_2$ и $T_3$, обозначающие время обработки запроса с учетом дочерних связующих элементов. Время $N_1$, затраченное на передачу данных от клиента до серверов системы, является константой в каждом конкретном случае и не учитывается в модели. Время на передачу данных внутри локальной сети $N_2$ и $N_3$ намного меньше времени обработки запроса и тоже не учитываются в модели. Следовательно, время обработки запроса веб-сервером Apache HTTP будет соответст-

вовать $Ht = T_1 - T_2 - T_3$, время обработки запроса веб-сервером Apache Tomcat будет соответствовать $Tt = T_2 - T_3$, а время обработки запроса СУБД Oracle будет соответствовать $Dt = T_3$. Таким образом, можно определить все необходимые входные параметры для имитационной модели, а также получить некоторое представление о работе системы при использовании конкретной схемы развертывания.

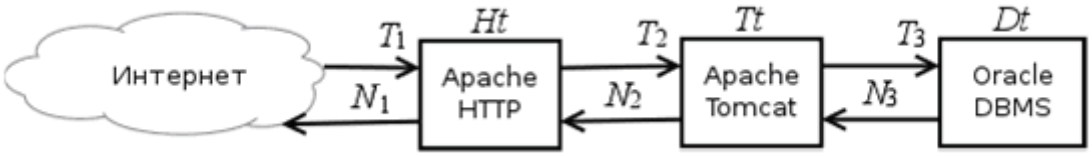



Рис. 4. Этапы обработки запроса в СДО AcademicNT

**Доработка гипервизора Xen**

Для виртуализации можно использовать как один сервер, так и несколько серверов при необходимости увеличения производительности. Но, чтобы иметь возможность работать с несколькими серверами как с одним целым, необходимо использовать общее хранилище данных для виртуальных машин. Так как одной из целей разработки стенда является снижение расходов при планировании развертывания системы, желательно избежать дополнительных расходов на общее хранилище данных на этапе планирования. Для решения этой проблемы используется модуль DRBD ядра Linux для реализации сетевого RAID первого уровня. К сожалению, на данный момент гипервизор Xen не поддерживает ряд функций при работе с томами DRBD. В частности, нет возможности работы с томами при использовании полной виртуализации и в случаях, когда гостевая система не умеет работать с ресурсами данного типа. На рис. 5 приведена схема, которая реализована в ходе разработки стенда, где полностью решена проблемы совместимости ресурсов DRBD и Xen. Для этого создан набор патчей для гипервизора Xen и сценарий для корректного управления DRBD ресурсами.

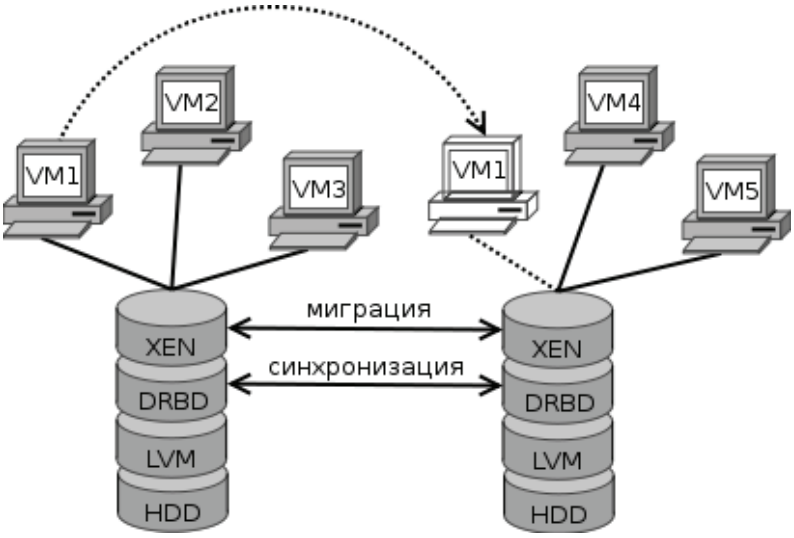



Рис. 5. Общая схема работы гипервизора Xen совместно с ресурсами DRBD поверх LVM томов

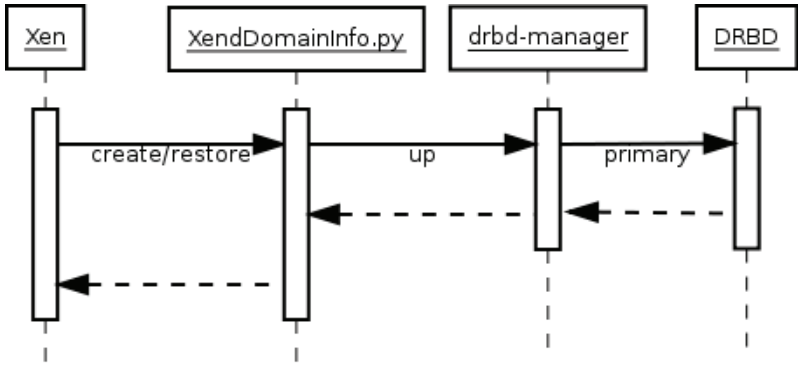



Рис. 6. Процесс создания и восстановления виртуальной машины

На рис. 6 приведена UML-диаграмма последовательности, на которой изображен механизм взаимодействия различных компонентов системы при создании виртуальной машины и восстановлении после сохранения состояния. На диаграммах ниже затронуты только те компоненты, которые подвергались

модификации или создавались вновь. На рис. 7 приведена диаграмма последовательности, описывающая процесс завершения работы виртуальной машины и принудительного уничтожения.

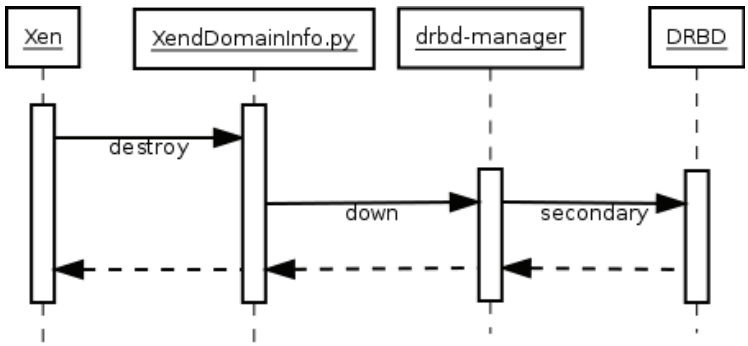



Рис. 7. Процесс завершения работы и уничтожения виртуальной машины

На рис. 8 проиллюстрирован процесс миграции виртуальной машины с одного хоста на другой. Поддерживается как холодная миграция, так и живая миграция, когда для перемещения по сети работающей виртуальной машины с одного сервера на другой не требуется ее остановка.

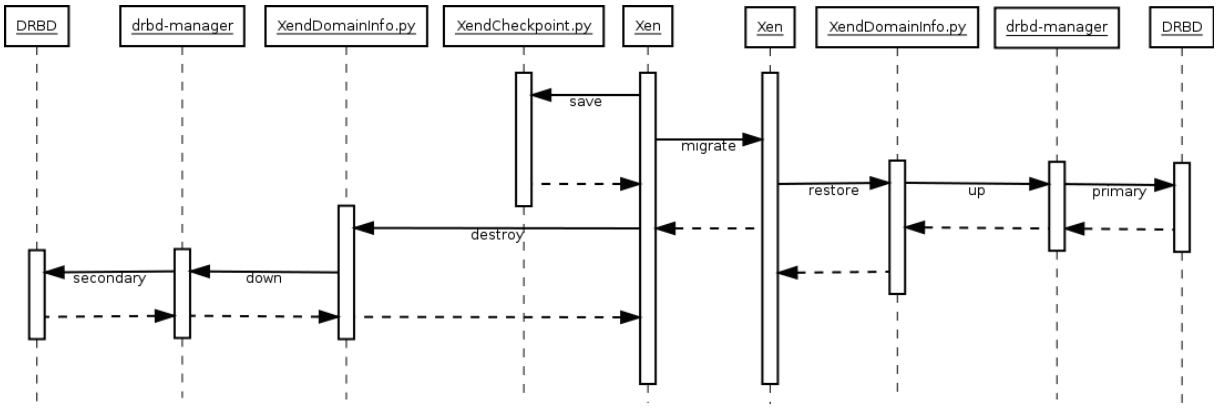



Рис. 8. Процесс миграции виртуальной машины с одного хоста на другой

**Заключение**

Спроектирован стенд, позволяющий создавать и опробовать различные схемы развертывания СДО AcademicNT. Разработан набор инструментов для исследования работы системы под нагрузкой. Реализован сбор и анализ статистики проводимых экспериментов для последующего использования в имитационных моделях и предложен вариант расширения возможностей гипервизора Xen.

**Литература**

1. Лямин А.В., Скшидлевский А.А. Методика и алгоритмы расчета вычислительной мощности аппаратной платформы системы для проведения ЕГЭ в компьютерной форме // Труды XV Всерос. н.-метод. конференции «Телематика'2009». – СПб, 2008. – Т. 1. – С. 101–102.
2. Лямин А.В., Скшидлевский А.А. Разработка поведенческой модели испытуемого при проведении педагогических измерений // Труды XVI Всероссийской научно-методической конференции «Телематика'2009». – СПб, 2009. – Т. 2. – 349 с.
3. Васильев В.Н., Лямин А.В., Чежин М.С. Система дистанционного обучения второго поколения // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2007. – № 45. – С. 148–157.
4. Лямин А.В., Скшидлевский А.А., Чежин М.С. Организация сетевого межвузовского взаимодействия в информационно-образовательной среде AcademicNT // Информационные технологии в обеспечении нового качества высшего образования. Сборник научных статей. Кн. 1 / Тр. конф. «Информационные технологии в обеспечении нового качества высшего образования (14–15 апреля 2010, Москва, НИТУ «МИСиС»)». – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов НИТУ «МИСиС», 2010. – С. 111–115.

***Скшидлевский Антон Алексеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, anton@cde.ifmo.ru

***Лямин Андрей Владимирович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, директор ЦДО, lyamin@mail.ifmo.ru

# 9 ЭКОНОМИКА И ФИНАНСЫ. МЕНЕДЖМЕНТ

**УДК 338.2**

## ОСОБЕННОСТИ ЭКОНОМИЧЕСКОГО ПОВЕДЕНИЯ УЧАСТНИКОВ АРТ-РЫНКА

**О.В. Васюхин, О.В. Тарарухина**

Рассмотрены особенности экономического поведения участников арт-рынка, выявленные эмпирическим путем; представлены ключевые характеристики основных типов участников рынка, а также описаны способы продвижения и дистрибуции произведений современного искусства.
**Ключевые слова**: инвестиции, экономическая модель, стоимость, коммуникации.

### Введение

Конец XX – начало XXI вв. ознаменовались стремительным ростом рынков произведений искусства во всем мире – антикварного, но в основном искусства XX века и в особенности современного искусства, созданного после 1960-х г., включая произведения ныне живущих художников. Уровень цен на их работы, участие финансовых институтов в их обороте, количество игроков и количество денежной массы, оборачивающееся на этом рынке [1], позволяют говорить о существовании мирового рынка инвестиций в произведения искусства, в том числе и современного.

Рынок произведений искусства во всем мире, и в России в том числе, имеет ряд особенностей по сравнению как с рынками потребительской продукции, так и с рынками инвестиций. Эти отличия обнаруживаются как в микро-, так и в макроэкономических характеристиках субъектов рынка и проявляются, в частности, в особенностях экономического поведения их участников. Известно, что каждый рынок индивидуален с точки зрения поведения его субъектов [2]. В настоящей работе речь пойдет об особенностях субъектов арт-рынка.

### Основные модели экономического поведения на арт-рынке

Описание моделей ведения хозяйственной деятельности на арт-рынке проводится на основании принятых на арт-рынке понятий, определенных респондентами в ходе многочисленных интервью, в статьях, исследованиях и аналитических отчетах по арт-рынку [3], а также опубликованных на сайтах информационных ресурсов, таких как www.arttactic.com и www.artinvestment.ru. К таким моделям относятся следующие виды деятельности.

- дилер – от агента до галереи;
- эксперт – от консультанта до музея;
- посредник – аукционный дом и арт-ярмарка;
- креатор – от куратора до заказчика.

К дилерам относятся хозяйствующие субъекты от арт-агента до арт-ярмарки. Главный признак этой модели – собственно экономические операции купли-продажи произведений искусства. Этот тип деятельности разнообразен, в нем присутствуют как собственно дилеры, занимающиеся перепродажей произведений, так и агенты, галереи. Агенты находят произведения искусства для коллекционеров за комиссию и наоборот – предлагают произведения коллекционерам. Галереи представляют собой дилера и агента в одном лице: они устраивают выставки художников, с которыми сотрудничают на более или менее долгосрочной и более или менее партнерской основе.

К экспертам относят такие модели, как арт-консультант, который продает свои знания и советует покупателю приобретение, иногда осуществляя по заказу поиск произведений искусства, так и банк, имеющий в своей структуре соответствующее подразделение, осуществляющее функции консультанта, или даже музей (прямо или косвенно подтверждающий значение произведения или имени автора для истории искусств и таким образом, его качество с точки зрения приобретения и инвестирования). Главная особенность этой модели – продажа информации, чаще всего это информация, сбор которой для неспециалиста затруднен, либо этот сбор информации сопряжен со значительными временными, денежными и иными затратами.

В качестве посредника авторы выделили модели аукционного дома, поскольку это единственная модель, в которой легально получается комиссия и с продавца, и с покупателя, и модель арт-ярмарки. Арт-ярмарки представляют собой географическое или виртуальное место, где в течение определенного срока галереи строго определенного направления, прошедшие отбор, продают и покупают произведения искусства; ярмарки проводятся с определенной регулярностью, галереи и посетители оплачивают свое участие. Эти модели объединяет то, что объектом продажи фактически является место и время, в которые встречаются продавец и покупатель.

Главной особенностью так называемого креатора является создание (и часто воплощение) идеи, замысла, способа представления и репрезентации. Фактически, это заказ художнику или группе художников на создание определенного произведения или группы произведений для определенных заказчиком целей. К этому типу моделей относятся биеннале, некоммерческие выставки.

При этом необходимо учитывать, что на практике границы между моделями часто размыты, так как в разных ситуациях могут использоваться разные компетенции одного и того же субъекта рынка. Например, эксперт может выступать в роли дилера и в роли креатора, дилер может выступать в роли эксперта и креатора, посредник может выступать в роли дилера, креатора и эксперта. В значительном количестве случаев представители этих моделей, являясь индивидами, т.е. личностями со своей репутацией и историей работы на рынке, могут также оказывать организационно-логистические, а также информационно-издательские услуги (писать статьи, издавать каталоги и книги). Возможность одним хозяйствующим субъектом объединять нескольких моделей в своем рыночном предложении не регламентируется международным законодательством или законодательством отдельных стран (насколько известно авторам статьи) и является значительным конкурентным и кооперационным преимуществом операторов, имеющих в своем «арсенале» максимальное количество компетенций, так как расширяет их диапазон собственной деятельности и возможности сотрудничества.

Таким образом, необходимо описать технологию создания, продвижения и дистрибуции продукта на арт-рынке. Для этой цели авторы провели теоретическое исследование и собрали эмпирические данные в процессе ряда интервью непосредственно с представителями описанных моделей экономического поведения как в России, так и за рубежом (Великобритания, Германия, США). В России площадками для исследования послужили, в частности: международный симпозиум «Музей и арт-рынок», проведенный в 2006 г. Государственным Эрмитажем и аукционным домом Christie's; круглый стол «ArtBanking: инвестиции в искусство», организованный агентством ArtBrand и журналом «Эрмитаж» в 2007 г., а также ежегодная международная конференция «Private Banking: искусство инвестирования», проводимая Дойче Банком в Москве, ежегодно проводимая арт-ярмарка «Арт-Москва» и московская биеннале.

### Технология создания, продвижения и дистрибуции продукта на арт-рынке

В связи с описанным разнообразием продуктов на арт-рынке достаточно сложным представляется описание и классификация всех возможных форм создания этих продуктов, наборов потребностей, ими удовлетворяемых, и ценностей, которые они предоставляют (конечному) потребителю. Основные модели экономического поведения созданы вокруг разных продуктов, однако все они существуют на одном и том же рынке, и не только сосуществуют, но и поддерживают существование и эффективность деятельности друг друга, образуя систему. С экономической точки зрения эти модели целесообразно сравнивать по следующим основаниям: носителю ценности; доле относительной ценности, которую клиент в итоге приобретает, качественному уровню искусства о котором идет речь, масштабу деятельности. Под носителем ценности понимается то, за что взимается цена. Это может быть само произведение, право использования этого произведения на определенное время, право воспроизведения изображений этого произведения, комиссия за поиск и оформление документов по покупке произведения, комиссия или фиксированная стоимость представления физических условий для сделки, стоимость информации и т.д.

Под основной составляющей приобретаемой вместе с произведением искусства ценности понимается значение содержания произведения и «авторского высказывания» для истории искусств, для актуальной социальной ситуации, для конкретного коллекционера. В связи с этим остановимся на рассмотрении в качестве товара-представителя произведений искусства, и для целей настоящей работы ограничимся рассмотрением только произведений современного искусства и взаимоотношений авторов этих произведений, художников, с описанными экономическими моделями ведения бизнеса.

Исходной позицией создания продукта является создание договорных отношений между художником и галеристом. Художникам часто предлагается контракт с гарантированным годовым гонораром и фиксированным процентом от продажи работ, а он, в свою очередь, обязуется создавать для этой галереи определенное количество работ в год и соблюдать верность этому галеристу, т.е. эксклюзивные условия на его произведения. В таком случае у галериста появляется дополнительная мотивация для продвижения работ и имени художника, и на первом этапе продвижения он занимается популяризацией его имени и произведений на всех уровнях рынка – от музеев до коллекционеров, печатает каталоги выставок и разнообразные материалы, информирующее об этом художнике. Чем чаще упоминается имя художника, тем известнее оно становится, тем популярнее и соответственно более востребованными становятся его работы. Для такого цитирования имени используются участие в международных проектах в одном ряду с признанными именами других художников прошлого и настоящего, в проектах как можно более высокого значения (например, проводимых музеем международного уровня); также само количество персональных и групповых выставок говорит об активности и серьезности автора (ведь чем более долгосрочна и активна его творческая деятельность, тем более защищены инвестиции всех участников рынка, имеющих с ним дело); количество и качество (не столько «хорошо или плохо», сколько кто написал статью – чем известнее автор и зна-

чимее его репутация как теоретика искусства, тем большее ей придается значение), и т.д. Именно таким способом и создается воспринимаемая ценность произведений современного искусства.

Масштаб деятельности галериста определяется широтой охвата целевой аудитории (физическое присутствие, представительство в основных центрах арт-рынка, присутствие в так называемом «информационном» пространстве – в специализированных регулярных изданиях), уровнем влияния на тенденции моды и создание имен, который трудно определить формально, но который проявляется, например, в доступе к таким ресурсам, как выставки в ведущих музеях мира или участие в ведущих биеннале, а также присутствием работ данного художника в коллекциях, на которые ориентируются участники рынка.

Для описания каналов коммуникаций, прежде всего, необходимо понять, с кем хозяйствующий субъект имеет дело, каковы особенности поведения покупателей произведений искусства. С точки зрения качественного уровня произведений все модели ведения экономической деятельности на арт-рынке предполагают выбор между качеством продукта, который они предлагают на рынке. Это могут быть произведения инвестиционного качества (с точки зрения профессионального сообщества, имеющие большое значение для истории искусств), произведения коллекционного качества (с точки зрения профессионального сообщества, отражающие актуальную социальную ситуацию, отвечающие вкусам коллекционеров, но не обязательно входящие спустя время в анналы истории) или их совмещение в некоторой пропорции.

Анализируя структуру потребителей моды, а мода является важным фактором клиентского поведения на арт-рынке, можно проследить и вхождение искусства в область экономической деятельности общества через следующие социальные группы: инноваторы (пионеры, экспериментаторы, пробующие новое, идущие своим путем и часто вразрез со сложившимися в обществе представлениями); лидеры, пользующиеся особым вниманием и уважением со стороны окружающих; так называемое раннее большинство (подражатели, в России, например, существует некоторое количество «клонированных» коллекций), и позднее большинство (скептики, консерваторы, но эта часть не относится к покупателям современного искусства) [5].

На следующем этапе продвижения основными каналами коммуникации на арт-рынке являются:

- некоммерческие выставки (в некоммерческих частных и государственных галереях, музеях, арт-центрах, на биеннале);
- коммерческие выставки (в галереях и на арт-ярмарках – выставки, где все объекты подлежат продаже);
- ярмарки, в которых участвуют галереи и мелкие арт-проекты;
- образовательные программы (организованные университетами и учебными заведениями, галереями, аукционными домами, государственными и частными арт-центрами);
- статьи в специализированных журналах, признанных в профессиональном сообществе, и монографии о художниках из персональных музейных или галерейных выставок;
- аукционы (организованные как аукционными домами, так и другими дилерами; аукционы по форме бывают открытые, закрытые, благотворительные);
- симпозиумы и конференции, на которых ничего не продается, однако художники имеют возможность поработать вместе и познакомиться ближе со своими коллегами; кураторы, писатели, коллекционеры, консультанты, дилеры и агенты имеют такую же возможность; результаты часто освещаются в специализированных изданиях.

Все указанные каналы коммуникаций с клиентами создают общее «информационное пространство», некий пространственно-временной контекст, в котором оборачивается – создается, существует, меняет хозяев – созданное произведение искусства, которое и благодаря своему содержанию, и благодаря контексту существования наделяется стоимостью в глазах покупателя. Подобная схема имеет универсальный характер, который отработан на исторически давно сложившихся рынках. К сожалению, в нашей стране подобного рода анализ провести затруднительно, поскольку субъекты арт-рынка в настоящее время еще только формируются и ищут пути самореализации.

Обобщим сказанное по вопросу о каналах дистрибуции. Произведения искусства продаются, во-первых, посредством частных, специально организованных для конкретного покупателя и произведения продаж. Во-вторых, коммерческие выставки имеют основной целью продвижение и продажу выставленных работ и работ художника, имеющихся в запасниках у галериста-дилера. При этом, в зависимости от культуры местонахождения галереи и от статуса самой галереи и художника, возможны случаи, когда не каждому коллекционеру, даже при наличии средств, продадут произведение, это зависит от стратегии продвижения данного художника и его рыночной истории. То же касается и продаж на арт-ярмарках, которые являются фактически временным дополнительным местом размещения галереи, но в которое она перемещается вместе со своими стратегиями деятельности. В-третьих, произведения покупаются и продаются на аукционах, где любой назначивший наибольшую цену и доказавший свою платежеспособность получает право купить произведение.

### Заключение

Рынок произведений искусства для стороннего наблюдателя представляет собой мало структурированную систему, имеющую, тем не менее, несколько уровней как по качеству произведений, оборачивающихся на рынке, так и по уровню и масштабам самих участников рынка – от частной галереи до музея международного уровня. Известно, что системы организуются сами до той степени, до которой это служит их интересам и устойчивости. Функционирование системы арт-рынка устроено в значительной мере на понятийной основе, и его экономическое структурирование и регулирование в настоящий момент затруднены. В связи с этим прогнозирование развития рынка довольно сложно отобразить. Но это не мешает говорить о его инвестиционном и инновационном потенциале, что связано также и с тем, что товар-представитель на этом рынке – произведения искусства – по своему определению не подлежат не только регулированию, но и все больше и больше с трудом поддаются классификации.

Таким образом, авторами предпринята попытка провести структурный анализ деятельности участников этого активно развивающегося рынка, особенно молодого для нашей страны, и все же уже активно развивающегося в последние двадцать лет. В работе кратко сформулирован процесс и способы создания ценности на арт-рынке.

### Литература

1. Васюхин О.В., Тарарухина О.В. Инновационные методы стратегического управления в сфере арт-рынка // Современные проблемы науки и образования. – 2009. – № 6. – 93 с.
2. Васюхин О.В. Анализ и оценка инновационной привлекательности отрасли // Научно-технический вестник СПб ГИТМО. – 2003. – № 7. – С. 7–83.
3. Ruston A. The Artist's Guide to Selling Work. – Fine Art Trade Guild and A&C Black, 2007.
4. Токарский Б.Л. Мотивация потребительского поведения – основа предпринимательской стратегии. – Иркутск: БРУЭП, 2007.

***Васюхин Олег Валентинович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор экономических наук, профессор, prof-vov52@mail.ru

***Тарарухина Ольга Вячеславовна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tararukhina@gmail.com

**УДК 339.1:347.7**

## СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ МИРОВОГО РЫНКА ОБЪЕКТОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

**А.В. Даюб, Н.С. Куркина**

В настоящее время технологический обмен превышает традиционные хозяйственные потоки товаров, услуг и капиталов. Но по-прежнему развивающиеся страны продолжают торговать технологиями, не защищенными правами интеллектуальной собственности, что сокращает доходы этих стран и замедляет темпы развития мирового рынка объектов интеллектуальной собственности (ИС). Приведены критерии целесообразности правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности на мировом рынке технологий, а также определены основные проблемы развития мирового рынка объектов ИС.

**Ключевые слова:** интеллектуальная собственность, мировой рынок объектов интеллектуальной собственности, проблемы мирового рынка объектов интеллектуальной собственности.

### Введение

Во времена развития научно-технического прогресса (НТП) производство приобрело наукоемкий характер, появились научно-исследовательские институты и проектно-конструкторские организации, что способствовало формированию интеллектуальной собственности (ИС) и развитию законодательства об ИС.

Но не все страны равнозначно преуспевают в этой области, в настоящее время в высокотехнологичном бизнесе, как и в целом в сфере экономики, сложились три крупнейших центра – США, Западная Европа, Япония, между которыми и разворачивается основная конкурентная борьба. Промышленно развитые страны занимают ведущее место в международной торговле лицензиями (до 80% их экспорта). США являются лидером лицензионной торговли, второе место в экспорте лицензий занимают страны Западной Европы, в импорте лицензий лидирует Япония. Развивающиеся страны занимают менее 20%, что объясняется как малой емкостью их технологического рынка, так и невысоким уровнем экспортируемых технологий [1].

НТП играет важнейшую роль в человеческом продвижении и развитии. Именно он способствовал сокращению доли людей, живущих в абсолютной бедности в развивающихся странах. А в период между 1990–2000 г.г. технический прогресс в развивающихся странах (т.е. странах с низкими доходами, с дохо-

дами ниже средних и с доходами выше средних) опередил прогресс в странах с высокими доходами. Разумеется, исходный уровень технического развития в странах с более низкими доходами был, прежде всего, значительно ниже [2]. Как следствие, технологический разрыв между богатыми и бедными странами сузился, хотя и остается широким. Страны с низкими доходами лишь на четверть используют технологии, применяемые в богатых странах. Сравнительно с размерами их экономики, эти страны осуществляют относительно немного передовых нововведений.

Распространению технологий среди развивающихся стран способствовал их расширяющийся доступ к иностранным технологиям. За последние 15 лет уровень прямых иностранных инвестиций и импорт высокотехнологичных и инвестиционных товаров удвоился в процентном отношении к ВВП, отчасти благодаря контактам с высокообразованными мигрантами, проживающими за границей.

Отчасти как результат этого расширившегося доступа новые технологии, такие как сотовые телефоны, компьютеры и Интернет, в настоящее время распространяются гораздо быстрее. В начале 1900-х г.г. новым технологиям требовалось более 50 лет, чтобы охватить большинство стран; в настоящее время этот процесс занимает примерно 16 лет.

НТП произвел переворот в структуре мирового рынка объектов ИС. За последние десятки лет компании развитых стран накопили значительный опыт организации инновационной деятельности. В связи с этим возникли различные формы международных отношений при внедрении научных разработок в производство.

Сегодня ни одна страна мира не может обеспечить себе передовые позиции во всех или во многих отраслях науки и техники. Развитие международного обмена технологиями в этих условиях является основным решением. Именно для увеличения потенциала освоения и создания новых идей развивающимися и развитыми странами необходим обмен технологиями на мировом рынке.

## Постановка проблемы

Основным условием, давшим начало развитию международного научно-технического сотрудничества, послужило неравномерное развитие стран в научно-технической сфере.

Конференция ООН по торговле и развитию (ЮНКТАД) определяет международный обмен технологиями как сделки на основе соглашений между сторонами, которые преследуют в качестве своей цели уступку по лицензии или передачу прав на промышленную собственность, продажу или любой другой вид передачи технических услуг.

По данным МВФ количество стран, обменивающихся технологиями, с 1960 г. увеличилось с 22 до 84, расширился объем ежегодных лицензионных операций, что свидетельствует о возрастающей экономический роли этой формы права на использование объектов ИС для всех участников обмена технологиями. По некоторым оценкам, в расчете на единицу затрат валютный эффект от реализации технологического ресурса на мировом рынке гораздо выше, чем экспорт обычных товаров. Технологический обмен превышает традиционные мирохозяйственные потоки товаров, услуг и капиталов. Но по-прежнему развивающиеся страны продолжают торговать технологиями, не защищенными правами интеллектуальной собственности, что замедляет темпы развития мирового рынка объектов ИС.

Ярким примером такой ситуации является Россия. Отличительной чертой российской торговли технологиями является преобладание неохраноспособных видов ИС, значительно менее ценных с коммерческой точки зрения. В экспорте технологий доминируют инжиниринговые услуги (36,4%), а также результаты исследований и разработок, не защищенные патентами (34,3%). На долю соглашений, предметами которых являлись охраняемые объекты промышленной собственности, в 2006 г. приходилось лишь 2,5% экспорта, тогда как в структуре импорта технологий эта доля достигла 42,8%. В результате средняя стоимость предмета соглашения по импорту технологий в 1,7 раза превышала среднюю стоимость соглашения по экспорту, что является признаком неэффективности торговли технологиями, усиления технологической зависимости России от зарубежных стран.

Судя по последним данным Росстата, в 2006 г. в России действовало 1900 соглашений по экспорту и 1675 соглашений по импорту технологий. Однако, несмотря на количественный перевес экспортных сделок, суммарные выплаты по импорту (1128 млн. долл.) в два с лишним раза превысили объем поступлений от экспорта технологий (533 млн. долл.), образовав отрицательное сальдо в размере 595 млн. долл. [3], что доказывает неэффективность торговли технологиями. Так, на примере России видно, как необходима правовая защита результатов интеллектуальной деятельности на мировом рынке технологий.

Целью работы является определение основных проблем развития мирового рынка объектов ИС, а также определение основных критериев целесообразности правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности на мировом рынке технологий.

## Целесообразность правовой защиты результатов интеллектуальной деятельности на мировом рынке технологий

Приобретение технологии на уровне предприятия способствует решению конкретных экономических и научно-технических проблем – преодолению узости научно-технической базы, недостатка произ-

водственных мощностей и других ресурсов, получению новых стратегических возможностей в развитии. Обмен технологиями на мировом рынке обеспечивается посредством экспорта и импорта технологий.

Целесообразность экспорта объектов ИС объясняется тем, что это:

- источник получения доходов;
- форма борьбы за товарный рынок;
- способ обойти проблемы экспорта соответствующего товара;
- способ установления контроля над зарубежной фирмой через такие условия лицензионного соглашения, как объем производства, участие в прибылях и т.п.;
- возможность доступа к другой технологии через «перекрестное лицензирование»;
- возможность более эффективного совершенствования объекта лицензии с участием покупателя и т.д.

Целесообразность импорта объектов ИС объясняется тем, что это:

- доступ к новшествам высокого технического уровня;
- средство экономии затрат на НИОКР, в том числе, и во времени;
- средство уменьшения расходов на товарный импорт и одновременно средство привлечения национального капитала и рабочей силы;
- условие расширения экспорта продукции, выпускаемой по зарубежным технологиям: во многих странах доля изделий, выпускаемых по лицензиям, в валютном экспорте превышает долю национальных изделий.

Анализ стран, добившихся успехов в реализации нововведений, выпуске и экспорте наукоемкой продукции, позволяет выделить некоторые типы стратегий инновационного развития.

Стратегия «переноса» заключается в использовании зарубежного научно-технического потенциала и переносе нововведений в собственную экономику. Она осуществлялась, например, в послевоенный период Японией, которая закупала у США, Англии и Франции лицензии на высокоэффективные технологии для освоения производства новейшей продукции, имевшей спрос за рубежом. На этой основе Япония создавала собственный потенциал, обеспечивший в дальнейшем весь инновационный цикл – от фундаментальных исследований и разработок до реализации их результатов внутри страны и на мировом рынке. В итоге экспорт японских технологий превысил их импорт, а страна, наряду с некоторыми другими, обладает передовой фундаментальной наукой.

Стратегия «заимствования» состоит в том, что, располагая дешевой рабочей силой и используя собственный научно-технический потенциал, страны осваивают производство продукции, производившейся ранее в более развитых странах, последовательно наращивая собственное инженерно-техническое обеспечение производства. Далее становится возможным проводить свои НИОКР, сочетая государственную и рыночную формы собственности. Такая стратегия принята в Китае и ряде стран Юго-Восточной Азии. Примером служит создание конкурентоспособной автомобильной промышленности, высокоэффективных средств вычислительной техники, бытовой электроники в Южной Корее.

Стратегии «наращивания» придерживаются США, ФРГ, Англия, Франция. На базе использования собственного научно-технического потенциала, привлечения зарубежных ученых и специалистов, интегрирования фундаментальной и прикладной науки эти страны постоянно создают новый продукт, высокие технологии, реализуемые в производстве и социальной сфере [1].

Все это определило возникновение и интенсивное развитие мирового рынка технологий, в том числе объектов ИС.

Наиболее распространенной формой передачи научно-технических знаний в настоящее время является международная торговля лицензиями. Это объясняется тем, что покупка лицензии позволяет снизить затраты на осуществление собственных НИОКР в 4–5 раз, а экономический эффект от использования зарубежных лицензий более чем в 10 раз превышает расходы на приобретение этих лицензий.

### Основные проблемы развития рынка объектов ИС

Проблемы развития мирового рынка объектов ИС, как правило, основываются на проблемах внутреннего рынка стран, не принимающих или неактивно принимающих участие в обмене технологиями.

Фундаментом для развития наукоемких технологий является **образование**. Огромное значение имеет как базовое образование человека, так его последипломное образование. Для поддержания конкурентоспособности человек вынужден совершенствовать свои знания в связи с быстро изменяющимися текущими потребностями рынка труда. Известно, что количество информации удваивается каждые пять лет. Это и должно определять мотивацию каждого участника производственного и научно-технического процесса на регулярное получение новых знаний.

Концепция непрерывного образования, разработанная в развитых странах в 1970-х г.г., стала для этих стран одним из эффективных инструментов, позволяющих решать проблемы соответствия квалификации специалистов и быстро растущего уровня знаний, умений и навыков, которого требует бурный технический прогресс.

Организациям и предприятиям, желающим обеспечить высокую конкурентоспособность своей продукции и услуг, необходимо поддерживать высокий профессиональный потенциал своих кадров путем непрерывного образования.

Помимо проблем непрерывного профессионального образования, многие страны страдают от безграмотности в области ИС. Многие изобретатели не придают особого значения правовой защите своих изобретений, что, в свою очередь, вытекает в следующую проблему – **продажа незащищенной продукции**.

Очень часто случается так, что для того, чтобы выжить, нередко распродаются за рубеж бесконтрольно, по дешевке, результаты научных исследований прошлых лет, часто без авторской защиты и без объективной оценки реальной стоимости интеллектуального продукта. Нередко плодами данных сделок пользуется узкий круг лиц, на оплате труда научного персонала это, как правило, не сказывается.

Проблемой многих стран является так называемая **«утечка мозгов»**. Например, в 1990–2000 г.г. произошел серьезный подрыв научно-технического потенциала России, выразившийся в резком сокращении научных учреждений, численности научных кадров, развала целых научных направлений, школ, сложившихся научных коллективов. В дальнейшем фактором данного подрыва явился обвальный спад производства (более чем в 2 раза в промышленности), особенно значительный в высокотехнологичных отраслях – приборостроении, электронике, микроэлектронике, производстве станков с ЧПУ, производстве сложной бытовой техники и др. Обвальный спад производства, с одной стороны, сопровождался резким сокращением возможностей бюджета финансировать сферы интеллектуального труда (науку, образование, культуру), с другой, – еще больше, за редким исключением, сократилась востребованность производством результатов интеллектуального труда. Сокращение ассигнований на НИОКР привело к свертыванию ряда важнейших направлений, ослабило материально-техническую базу, резко понизило оплату труда научных и инженерных кадров, что способствовало падению престижа интеллектуального труда в науке и в НИОКР. Все это стимулировало отток из страны научных и инженерно-технических кадров. В середине 90-х г.г. ежегодный отток только научных кадров составлял 5–6 тыс. человек. Кроме того, утечка мозгов происходит за счет выезда за рубеж на временную работу на конкурсной основе. Примерно 10–15% из этого контингента там остается навсегда. Причем, в первую очередь страну покидают высококвалифицированные кадры наиболее важных для современного наукоемкого производства профессий. С 1990 г. Россию покинули 80% математиков и 50% физиков [4]. Таким образом, **увеличивается концентрация научных работников в развитых странах**, в странах, мотивирующих своих граждан к интеллектуальной деятельности.

Важным фактором, определяющим как состояние науки, так и изобретательства для некоторых стран, является крайне **низкая инновационная активность реального сектора**, которая чревата не только отставанием в технологическом обновлении производства, но обрекает науку быть в угасающем состоянии. В России используется менее 2% действующих патентов, в Японии – 95%, в США – 62%. В настоящее время в России только одно из 500 запатентованных изобретений находит применение в промышленности. В свете этого, каким бы совершенным не был сформированный правовой институт ИС, реальное положение исследователей и изобретателей будет оставаться весьма плачевным, если спрос на продукт их интеллектуальной деятельности будет отсутствовать.

Конечно же, основной международной проблемой остается **нелегальная передача технологий** – это и промышленный шпионаж, и техническое пиратство. Среди наиболее распространенных злоупотреблений эксперты отмечают недобросовестную регистрацию товарных знаков, нарушение патентных прав, использование товарных знаков, похожих до степени смешения с известными мировыми брендами и т. п. Одной из главных проблем в последнее время стало производство и распространение контрафактной продукции, прежде всего авторских произведений на электронных носителях. По мнению экспертов, процент контрафактной продукции на рынках западных стран составляет в среднем 15%, в странах бывшего СССР — около 60%, а по некоторым категориям товаров (CD/DVD) около 90%. Именно контрафактная продукция является причиной колоссальных убытков и уменьшения объемов операций на мировом рынке объектов ИС. Наличие эффективной правовой охраны ИС признано важным условием динамичного развития экономики любой страны, поскольку правильная государственная политика в этой области является стимулирующим фактором подъема интеллектуальной деятельности.

Также одной из основных проблем отсталости большинства развивающихся стран на рынке объектов ИС является **отсутствие инвестиций** в НИОКР. Развивающиеся страны в основном импортируют, но не создают технологии, поскольку в них не развито или слабо развито венчурное финансирование. Финансирование в научно-исследовательскую деятельность развивающихся стран – дело особо рисковое. Но в последнее время наметилась тенденция притока частного капитала в страны с низким уровнем доходов.

На мировом рынке технологий главными субъектами выступают транснациональные компании (ТНК), в которых происходит совместное использование результатов НИОКР материнскими и дочерними компаниями, в результате чего мировой рынок технологий развит лучше национального. Около 2/3 мирового технологического обмена приходится на внутрифирменный обмен ТНК. Более 60% лицензионных поступлений промышленно развитых стран приходится на долю внутрикорпорационных поступ-

лений (в США – 80%). Крупнейшие ТНК сосредотачивают исследования в своих руках, что способствует **монополизации мирового рынка технологий** (уровень монополистического контроля 89–90%). Технологический разрыв между странами, находящимися на разных ступенях экономического развития, определяет минимум двухуровневую структуру рынка технологий: высокие технологии, обращающиеся преимущественно между промышленно развитыми странами; средние и низкие технологии могут быть новыми для рынка развивающихся и трансформирующихся стран и предметом технологического обмена между ними.

## Заключение

Мировой рынок технологий способствует интеллектуализации мировой экономики в целом. Экспорт технологий, защищенных правами ИС, способствует увеличению доходов, а импорт – доступу к новшествам высокого технического уровня и экономии затрат на НИОКР. Но, несмотря на это, многие страны, особенно развивающиеся, продолжают осуществлять операции на мировом рынке технологий, пренебрегая правами ИС, что снижает темпы развития мирового рынка объектов ИС. По мнению авторов, основными причинами такого поведения участников рынка является их безграмотность в области ИС. Главными проблемами развития мирового рынка объектов ИС можно назвать взаимоотношения между развитыми и развивающимися странами: высокие технологии, в основном, вращаются среди развитых стран, а средние и низкие – среди развивающихся. Правительства развивающихся стран не способны мотивировать своих научных работников, что способствует оттоку кадров в развитые страны, а это, в свою очередь, приводит к высокой концентрации технологических ресурсов в небольшом числе государств.

Большой проблемой, например, для России является низкая востребованность запатентованных изобретений в реальном секторе, что стопорит процесс развития других наукоемких изобретений в стране.

Глобальной проблемой остается контрафакт результатов интеллектуальной деятельности, возможно, наиболее действенным способом решения этой проблемы может служить эффективная правовая охрана ИС и более ужесточенные меры наказания.

## Литература

1. Центр дистанционных образовательных технологий. Любецкий В.В. Мировая экономика (учебно-методический комплекс) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.e-college.ru/xbooks/xbook006/book/index/index.html?go=part-011*page.htm, свободный. Яз. рус. (дата обращения 17.01.2011).
2. Бэрнс Э. Преодоление технологического разрыва // Финансы & развитие. Ежеквартальный журнал Международного валютного фонда. – 2008. – № 2. – С. 46–47.
3. «Группа восьми» в цифрах. 2009: Стат.сб– М.: Росстат Г90,. 2009. – 131 с.
4. Иванов М.Ю., Иванова Р.К. Становление института интеллектуальной собственности в России / Сборник АКДИ. – 2001.

***Дзюб Анастасия Викторовна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат философских наук, доцент, anastasiya.dayub@gmail.com

***Куркина Наталия Сергеевна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, gav-kitten@yandex.ru

# КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

**УДК 681.51.015**

## К ЗАДАЧЕ УПРАВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИ НЕ ОПРЕДЕЛЕННЫМ ЛИНЕЙНЫМ ОБЪЕКТОМ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В КАНАЛЕ УПРАВЛЕНИЯ

**А.А. Бобцов, А.А. Пыркин**

Обсуждается идея синтеза стабилизирующего регулятора по измерениям выходной переменной для линейной параметрически не определенной системы с запаздыванием в канале управления.
**Ключевые слова:** управление по выходу, системы с запаздыванием в канале управления, стабилизация.

Проблема управления по выходу параметрически не определенными системами является крупной проблемой современной теории автоматического регулирования. Данной задаче посвящено большое количество публикаций, как российских так и зарубежных исследователей [1]. Однако большинство подходов не учитывает запаздывание в канале управления. Имеется ряд публикаций [2], в которых предлагается решение задачи управления линейным параметрически не определенным, но асимптотически устойчивым объектом в условиях запаздывания. Методов стабилизации по измерению выходной переменной для неустойчивого параметрически не определенного объекта с произвольной относительной степенью и запаздыванием в канале управления, насколько известно авторам, не существует. В работе предлагается идея стабилизации для указанного класса объектов на базе методов последовательного компенсатора [3] и предиктора Смита–Крстича [4]. Рассмотрим объект управления вида

$$a(p)y(t) = b(p)u(t-D), \tag{1}$$

где $p = d/dt$ обозначает оператор дифференцирования; выходная переменная $y = y(t)$ измеряется, но ее производные недоступны для измерения; $b(p)$ и $a(p)$ – полиномы с неизвестными коэффициентами; передаточная функция $b(p)/a(p)$ имеет относительную степень $\rho = n - m$; полином $b(p)$ – гурвицев; $D > 0$ – неизвестное постоянное запаздывание; $u(\vartheta) = \varphi(\vartheta)$ для $\forall\theta \in [-D, 0]$. В случае $D = 0$ для стабилизации системы (1) используется закон управления вида [3]

$$u(t) = -\mu k^{\mathrm{T}}\xi(t), \tag{2}$$

где вектор $\xi(t)$ является решением системы $\dot{\xi}(t) = \sigma\Gamma\xi(t) + \sigma q y(t)$; число $\mu > 0$ выбирается таким образом, чтобы передаточная функция $H(p) = \dfrac{\alpha(p)b(p)}{a(p) + k\alpha(p)b(p)}$ была строго вещественно положительной; параметр $\sigma >> k$ [3]; $\Gamma$ – гурвицева матрица размером $\rho \times \rho$; $k$ и $q$ – векторы соответствующих размерностей [3].

На базе предиктора Смита–Крстича (стр. 18 в [4]) для случая $D > 0$ предлагается модифицировать алгоритм (2) следующим образом:

$$u(t) = -\mu k^{\mathrm{T}}\left(e^{\sigma\Gamma D}\xi(t) + \sigma\int_{t-D}^{t} e^{\sigma\Gamma(t-\theta)} q y(\theta) d\theta\right). \tag{3}$$

Закон управления (3) позволяет компенсировать запаздывание в канале управления и обеспечить асимптотическую устойчивость замкнутой системы.

1. Мирошник И.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. – СПб: Наука, 2000.
2. Паршева Е.А., Цыкунов А.М. Адаптивное управление объектом с запаздывающим управлением со скалярным входом-выходом // Автоматика и телемеханика. – 2001. – № 1. – С. 142–149.
3. Бобцов А.А., Николаев Н.А. Синтез управления нелинейными системами с функциональными и параметрическими неопределенностями на основе теоремы Фрадкова // Автоматика и телемеханика.– 2005. – № 1. – С. 118–129.
4. Krstic M. Delay Compensation for Nonlinear, Adaptive and PDE Systems. – Birkhauser, 2009.

***Бобцов Алексей Алексеевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, декан, bobtsov@mail.ifmo.ru
***Пыркин Антон Александрович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, ассистент, a.pyrkin@gmail.com

УДК 681.3

# ОЦЕНКА И ВЫБОР ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫХ КОНФИГУРАЦИЙ МЕЖСЕТЕВЫХ ЭКРАНОВ

**В.А. Богатырев, С.Б. Фокин, М.В. Попова**

Предлагается оценка надежности и производительности вариантов резервирования межсетевых экранов в системе, включающей уровни входных коммутационных узлов, межсетевых экранов, внутренних коммутационных узлов и группы серверов.

**Ключевые слова:** надежность, производительности, отказоустойчивость, межсетевые экраны.

Эффективность информационной защиты центров обработки данных во многом определяется выбором средств обеспечения отказоустойчивости межсетевых экранов. Рассмотрено влияние организации отказоустойчивого подключения сетевых экранов на надежность и производительность систем, содержащих $L$ групп серверов. Объединение серверов в каждой группе и их подключение к межсетевым экранам проводится через внутренние коммутационные узлы, распределение входного потока запросов к межсетевым экранам производится через входные коммутационные узлы.

Рассмотрим варианты отказоустойчивой системы, включающие $L$ групп резервированных межсетевых экранов, каждая из которых обслуживает запросы к одной группе серверов, когда:

- подключение резервных экранов внутри группы происходит по мере отказа основных (*a*);
- внутри каждой группы происходит распределение нагрузки на все исправные экраны, перераспределение нагрузки между экранами разных групп не предусматривается (*b*);
- внутри каждой группы происходит распределение нагрузки на все исправные экраны, перераспределение нагрузки между экранами разных групп реализуется после отказа всех экранов группы (*c*);
- $N$ межсетевых экранов объединяются в кластер, при котором запрос к любому серверу может обслуживаться любым экраном (*d*).

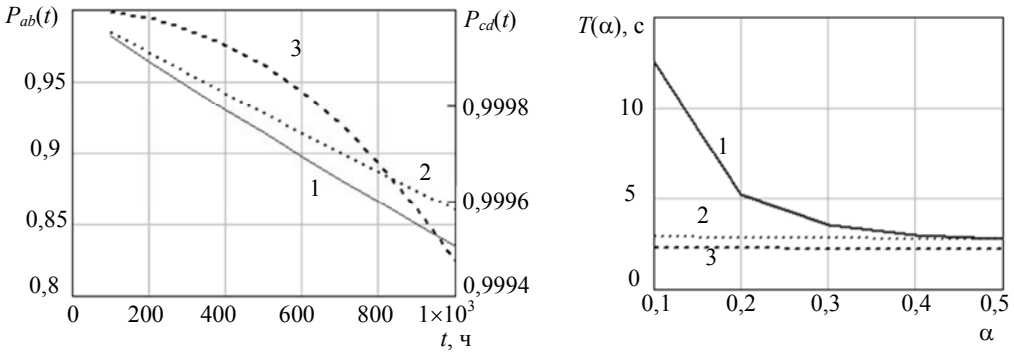
Для случаев *a, b* и *c, d* при одинаковой интенсивности отказов основного и резервного оборудования вероятность безотказной работы системы равна $P_{ab}(t) = P_0(t)\left[P_1(t)P_2(t)P_3(t)\right]^L$ и $P_{cd}(t) = P_0(t)P_{11}(t)\left[P_2(t)P_3(t)\right]^L$, причем $P_i(t) = 1-\left[1-p_i(t)\right]^n$, где $p_i(t) = e^{-\lambda t}$, а $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – интенсивности отказов узлов уровня входных коммутаторов, межсетевых экранов, внутренних коммутаторов и серверов, $n_i$ – число узлов в группе $i$-го уровня; $P_i(t) = 1-\left[1-p_i(t)\right]^N$. Результаты расчета вероятности безотказной работы при $\lambda_0=\lambda_2=0{,}00001$ 1/ч, $\lambda_1=\lambda_3=0{,}00005$ 1/ч, $n_0=2$, $n_2=3$, $n_3=4$, представлены на рисунке а, на котором вероятности $P_{ab}(t)$ для $n_1=1$ и $n_1=3$ соответствуют кривые 1 и 2, а вероятности $P_{cd}(t)$ при $N=3$ соответствует кривая 3. Для систем из двух групп серверов ($L=2$), интенсивность запросов к которым $\alpha\lambda_0$ и $(1-\alpha)\lambda_0$, а среднее время обслуживания в узлах соответствующих уровней $v_0, v_1, v_2, v_3,$, среднее время пребывания запросов в системах без объединения и с объединением экранов в кластеры вычислим как

$$T_a = \frac{v_0}{1-\lambda_0 v_0/n_0} + \frac{\alpha v_1}{1-\alpha\lambda_0 v_1} + \frac{(1-\alpha)v_1}{1-(1-\alpha)\lambda_0 v_1} + T(\alpha);$$

$$T_b = \frac{v_0}{1-\lambda_0 v_0/n_0} + \frac{\alpha v_1}{1-\alpha\lambda_0 v_1/n_1} + \frac{(1-\alpha)v_1}{1-(1-\alpha)\lambda_0 v_1/n_1} + T(\alpha);\ T_d = \frac{v_0}{1-\lambda_0 v_0/n_0} + \frac{\alpha v_1}{1-\alpha\lambda_0 v_1/N} + T(\alpha);$$

$$T(\alpha) = \alpha\left[\frac{v_2}{1-\alpha\lambda_0 v_2/n_2} + \frac{v_3}{1-\alpha\lambda_0 v_3/n_3}\right] + (1-\alpha)\left[\frac{v_2}{1-(1-\alpha)\lambda_0 v_2/n_2} + \frac{v_3}{1-(1-\alpha)\lambda_0 v_3/n_3}\right].$$

Результаты расчета среднего времени пребывания запросов в системах при $\lambda_0=1{,}31$/с, $v_0=v_2=0{,}1$ с, $v_1=0{,}8$ с, $v_2=2$ с, $n_0=2$, $n_2=2$ представлены на рисунке б. Варианту без объединения экранов в кластер при $n_1=1$ соответствует кривая 1, а с объединением при $N=2$ и $N=4$ – кривые 2 и 3.




а б

Рисунок. Вероятность безотказной работы (а) и среднее время пребывания запросов (б) в системе

Представленные зависимости подтверждают эффективность объединения межсетевых экранов в кластеры, при котором достигается сбалансированность загрузки и большая надежность и производи-

тельность системы в целом, вместе с тем такое объединение приводит к увеличению числа сетевых адаптеров и портов коммутаторов, что увеличивает стоимость системы, а поэтому требует решения оптимизационной задачи [2, 3].

1. Романов М. Отказоустойчивая безопасность // Storage News. – 2007. – № 2 (31). – С. 20–24.
2. Богатырев В.А., Богатырев С.В. Критерии оптимальности многоуровневых отказоустойчивых компьютерных систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2009. – № 5. – С. 92–97.
3. Богатырев В.А., Богатырев С.В**.** Объединение резервированных серверов в кластеры высоконадежной компьютерной системы // Информационные технологии. – 2009. – № 6. – С. 41–47.

***Богатырев Владимир Анатольевич*–** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, Vladimir.bogatyrev@gmail.com
***Фокин Сергей Борисович* –** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, tacit@list.ru
***Попова Марина Викторовна* –** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, 24-09@mail.ru

**УДК 535.65, 628.93**

## ОРГАНИЗАЦИЯ ОСВЕЩЕНИЯ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЦВЕТОВОГО АНАЛИЗА ПРОМЫШЛЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

**Е.В. Горбунова, В.С. Перетягин, А.Н. Чертов**

Рассмотрены особенности организации освещения рабочей зоны для оптико-электронных систем технического зрения промышленного назначения с точки зрения решения задачи цветового анализа. Предложена концепция реализации источника излучения, образованного аддитивным смешением излучений светодиодов различных цветов, с управляемой цветностью.
**Ключевые слова**: цветовой анализ, оптико-электронная система, источник излучения, аддитивное смешение.

В условиях все возрастающей сложности разнообразных производственно-технологических процессов, увеличения числа требующих оперативного анализа параметров и характеристик процессов и объектов регистрации все большую актуальность приобретают адаптивные системы контроля, инвариантные к поставленной задаче и условиям работы, способные функционировать в многопараметрическом информационном пространстве при сложной фоно-целевой обстановке. Перспективным является применение оптико-электронных систем технического зрения, реализующих цветовые методы анализа, использование которых позволит распознавать объекты регистрации не только по цветовой характеристике, но и по форме, ориентации в пространстве, наличию дефектов поверхности и др. [1].

При анализе цветности отображения объекта при известных характеристиках приемника излучения и свойствах самого объекта первичной задачей является формирование цветовой и светотеневой обстановки, адекватной решаемой задаче и условиям работы. Исследование особенностей процесса автоматического анализа объектов, сложных по структуре и цвету поверхности, показало, что с точки зрения эффективности освещения (его однородности и равномерности, минимизации количества теневых участков, качества цветопередачи) оптимальным является использование модификации схемы 45/0, рекомендованной МКО, с пространственно разнесенными элементами системы облучения, симметрично расположенными относительно узла регистрации [2]. В качестве источников излучения предлагается использовать матрицы из светодиодов красного (R), зеленого (G) и синего (B) цветов, что позволит обеспечить настройку системы и ее адаптацию к особенностям решаемой задачи посредством адресного управления отдельными светодиодами. Для компенсации недостатков воспроизведения RGB-матрицей цветов в диапазоне от зеленого до красного возможно применение шестицветной модели источника из светодиодов трех основных и трех дополнительных (голубого, пурпурного и желтого) цветов. Использование этой модели поможет оптимизировать спектральные характеристики излучателя.

Работа проводилась в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы по государственному контракту № 02.740.11.0169 от 25 июня 2009 г.

1. Горбунова Е.В., Жуков Д.В., Чертов А.Н. Промышленные оптико-электронные системы цветного зрения // Приборостроение. – 2010. – № 5. – С. 80–81.
2. Chertov Alexander N., Gorbunova Elena V., Korotaev Valeriy V. Singularity of the Light Sources Radiation Parameters Changing Effect upon Illuminated Object Colors Representation by Optical Detector // Proceedings of ODF'10. – Yokohama, 2010. – 20PSp-68.

***Горбунова Елена Васильевна* –** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, научн. сотр., vredina_ia@mail.ru
***Перетягин Владимир Сергеевич* –** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, студент, peretyagin@mail.ru
***Чертов Александр Николаевич* –** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кандидат технических наук, доцент, a.n.chertov@mail.ru

УДК 621.383+681.78.01

## СТРУКТУРА ОБОБЩЕННОЙ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ УГЛОМЕРОВ

**М.П. Андерсон**

Рассматриваются особенности обобщенной компьютерной модели оптико-электронных угломеров.
**Ключевые слова:** компьютерная модель, оптико-электронный угломер, структурная схема.

Структура обобщенной компьютерной модели (КМ) оптико-электронной системы (ОЭС) и ее отдельных составных частей-модулей рассмотрена в [1]. Можно более подробно рассмотреть принципиальные особенности этой КМ ОЭС, свойственные, прежде всего, входящему в ее состав модулю «Структура ОЭС» в случае моделирования структуры оптико-электронного угломера (ОЭУ).

Данные о субмоделях типовых узлов ОЭУ и алгоритмах обработки сигналов могут содержаться в базе данных КМ – в отдельных ее разделах [1]. При компьютерном моделировании в процессе системотехнического или схемотехнического проектирования ОЭУ пользователь КМ может выбирать исходные данные и требования к показателю эффективности работы ОЭУ как из других модулей КМ ОЭУ (из отдельных разделов модулей «Показатели эффективности», «Фоноцелевая обстановка»), так и из модуля «База данных КМ ОЭУ», если в его составе имеются соответствующие подразделы.

Субмоделями отдельных узлов, входящих либо непосредственно в модуль «Структура ОЭУ», либо в модуль «База данных КМ ОЭУ», могут быть субмодели оптической системы, анализатора изображения, приемника излучения, электронного тракта, рабочей меры, системы отображения или измерения выходного сигнала и сопоставления его с рабочей мерой, системы стабилизации или управления визирной осью, а также шумов, имеющих место в угломере (в отдельных его узлах). На рисунке приведен один из возможных вариантов модуля «Структура ОЭУ».

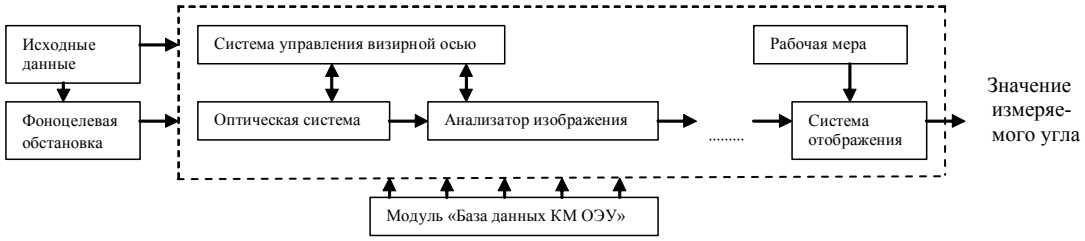



Рисунок. Структура ОЭУ

Достаточно распространенными алгоритмами, используемыми при обработке сигналов в ОЭУ, могут быть алгоритм измерения или слежения за положением визируемого объекта, корреляционный алгоритм, алгоритм фильтрации (пространственной, временной, спектральной), алгоритм выборки и квантования сигналов, алгоритм временной задержки и интегрирования (наложения), алгоритм линеаризации выходного сигнала. Эти алгоритмы неоднократно рассматривались в [2].

1. Торшина И.П. Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации. – М.: Логос, 2011. – 248 с.
2. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. – М.: Логос, 2011. – 568 с.

***Андерсон Мария Павловна*** **–** Московский государственный университет геодезии и картографии, аспирант, m-anderson@yandex.ru

УДК 681.568

## ИЗМЕРИТЕЛЬ УРОВНЯ ЖИДКОСТИ НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА

**А.А. Киянов, В.Л. Ткалич, А.Н. Волченко**

Рассмотрены недостатки существующих амплитудных оптоволоконных датчиков, а также методы обработки сигналов, вопросы теории погрешности. Предложен модифицированный волоконно-оптический датчик с опорным каналом.
**Ключевые слова:** волоконно-оптический датчик, измерительный канал, чувствительный мембранный элемент.

Одним из важнейших направлений развития измерительной техники является создание новых методов и приборов, основанных на использовании оптических эффектов и предназначенных для регистрации и контроля температуры, давления, скорости, уровня жидкости и ускорения, определения интенсивности электрического и магнитного полей. Сложность внедрения измерительных систем в системы управления состоит в том, что приборы должны соответствовать требуемым параметрам безопасности и, в то же время, иметь высокую быстроту отклика и работоспособность, обладать малыми габаритами и надежностью. Именно этим критериям удовлетворяют оптоволоконные датчики [1].

Предложен измеритель уровня жидкости на основе амплитудного волоконно-оптического датчика, который соответствует требованиям системы управления топливно-энергетическим комплексом: абсо-

лютная пожаро-взрывобезопасность, устойчивость к электромагнитным помехам, термическая стабильность и коррозионная стойкость, малые габариты и масса, высокая технологичность, экономичность производства.

Общее ограничение для большинства оптоволоконных датчиков интенсивности – это отсутствие опорного сигнала. Если изменяется выходной уровень источника света или потери в волокне колеблются в зависимости от времени, это приводит к ошибочному измерению. Недостатком измерительных систем на основе амплитудного датчика является то, что выходной сигнал его измерительного канала существенно зависит от температуры и механических вибраций [2, 3].

Предлагаемый авторами датчик (рисунок) состоит из оптоэлектронного блока с источником и приемником излучения, чувствительного мембранного элемента 1 и волоконно-оптического преобразователя 2, общий оптический торец которого обращен к мембране, а торцы передающего и приемного световодов состыкованы соответственно с источником светоизлучающего диода (СИД) и приемником излучения (фотодиод).

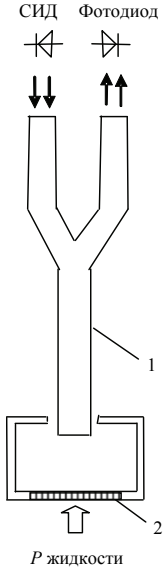



Рисунок. Амплитудный волоконно-оптический датчик: 1 – волоконно-оптический преобразователь с опорным каналом; 2 – титановая мембрана

Когда на мембрану не действует давление $P_{\text{жидкости}}$, она имеет плоскую форму и отражает в световоды приемного оптического канала световой поток определенной величины. При воздействии на мембрану давления (зависящего от уровня жидкости) она становится выпуклой и начинает работать по принципу выпуклого сферического зеркала. Этот прогиб мембраны уменьшает расстояние от торца световодов до мембраны. При этом уменьшается поток отраженного от мембраны излучения [4]. Это изменение регистрируется приемником излучения, где оптический сигнал преобразуется в электрический, который, в свою очередь, усиливается и обрабатывается последующими электронными устройствами.

Для повышения точности измерений давления столба жидкости применены в основном конструктивные, технологические и схемотехнические методы [4]. Разработанный метод повышения точности измерений основан на получении информационной избыточности – дополнительной информации не только об измеряемой физической величине, но и погрешностях, допускаемых при измерениях. Применение указанного метода позволяет синтезировать измерительную систему высокой точности на базе нестабильных измерительных преобразователей. Для увеличения точности и компенсирования погрешностей вводим дополнительное оптическое волокно в конструкцию датчика в качестве опорного сигнала, что позволит снизить чувствительность выходного сигнала к изменениям амплитуды источника и температуры.

Таким образом, предложенный измеритель уровня жидкости на основе амплитудного волоконно-оптического датчика повышает качество измерений, удовлетворяет быстро растущую потребность контрольно-измерительной техники в приборах, обладающих высокой точностью и быстродействием.

1. Фрайден Дж. Современные датчики. – М.: Машиностроение, 2005. – 592 с.
2. Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г. и др. Световодные датчики. – М.: Машиностроение, 1990. – 326 с.
3. Бутусов М.М., Галкин С.Л. и др. / Под общ. ред. М.М. Бутусова. Волоконная оптика и приборостроение. – Л.: Машиностроение, 1987. – С. 214–227.
4. Ткалич В.Л., Лабковская Р.Я., Пирожникова О.И. Метод повышения надежности упругих чувствительных элементов систем управления и автоматики // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2011. – № 1. – С. 136–138.

***Киянов Александр Александрович*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, resever-k@yandex.ru
***Ткалич Вера Леонидовна*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, studsovet_itmo@mail.ru
***Волченко Александр Николаевич*** – Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, wolf2684@mail.ru

**УДК 002.6:004.89**

# ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ РАЗВИТИЯ АРКТИЧЕСКИХ РЕГИОНОВ РОССИИ: ЗАДАЧИ, МЕТОДЫ, ТЕХНОЛОГИИ

**А.В. Маслобоев, В.А. Путилов**

Предложены единая методологическая база исследования и подходы к решению задач информационно-аналитической поддержки управления комплексной безопасностью развития арктических регионов России (на примере Мурманской области) на основе имитационного моделирования и когнитивных информационных технологий.
**Ключевые слова:** когнитивные информационные технологии, управление, безопасность, региональное развитие, имитационное моделирование.

На настоящем и последующих этапах развития общественных отношений безопасность выступает важнейшим фактором устойчивого развития. Особую значимость эта проблема приобретает для арктических регионов, превращающихся в одну из основных баз будущего развития страны. Специфика безопасности развития региональной социально-экономической системы (в частности, арктической зоны) состоит в том, что, с одной стороны, уровень безопасности региона существенно зависит от глобальных угроз, с другой стороны, возможные кризисы и чрезвычайные ситуации, обусловленные особенностями региона, способны привести к дестабилизации систем более высокого уровня – федерального, международного, мирового.

Одной из главных целей государственной политики Российской Федерации (РФ) в Арктике с точки зрения обеспечения национальной безопасности страны является развитие сферы информационных технологий и связи. Единое информационное пространство, сформированное с учетом специфических особенностей арктической зоны РФ, способно обеспечить системообразующую основу при подготовке, планировании и реализации мероприятий государственной политики в Арктике. В связи с этим, актуальным представляется организация и проведение отдельных комплексных исследований в сфере создания и развития когнитивных компьютерных технологий информационно-аналитической поддержки управления безопасностью развития арктических регионов и разработки методов и средств формирования единого информационного пространства арктической зоны РФ.

Пилотным полигоном исследований предполагается Мурманская область, как типичный и наиболее изученный промышленно-экологический регион арктической зоны РФ. Мурманская область – уникальный арктический регион с точки зрения ее геополитического и геоэкономического положения, роли в обеспечении обороноспособности страны, запасов природных ресурсов. К основным видам безопасности Мурманской области относятся экономическая, техногенная, экологическая, социальная.

Цель исследований заключается в разработке и развитии когнитивных моделей, методов и технологий информационно-аналитической поддержки управления безопасностью регионального развития для повышения устойчивости региональной экономической системы и создания благоприятной среды (условий) для эффективного развития интеллектуального, инновационного, промышленного и социально-экономического потенциала региона.

В рамках реализации проекта по созданию на территории Мурманской области специализированного Центра исследований и обеспечения безопасности в Арктике и информационной поддержки его функционирования актуальной также представляется задача формирования сетевой информационной инфраструктуры безопасности региона для повышения эффективности взаимодействия организационных структур, на которых возложены функции по обеспечению безопасности функционирования конкретных региональных подсистем и их компонентов. В качестве технологической платформы для практической реализации и развертывания такой инфраструктуры будут использованы современные технологии одноранговых распределенных информационных систем, интеллектуальные информационные технологии, в частности, технология мультиагентных систем, а также Интернет-технология и средства телекоммуникаций.

Развиваемая теория управления безопасностью регионального развития, также как и концепция устойчивого развития, базируется на системном подходе, т.е. рассматривает объект управления (страну, регион, конкретную отрасль и т.п.) как систему. Это, в свою очередь, обеспечивает возможность использования современных достижений в сфере компьютерных технологий и методов моделирования для исследования функционирования региональных социально-экономических систем с целью разработки эффективных методов и средств поддержки управления безопасностью их развития.

Основными задачами в области информационно-аналитической поддержки управления безопасностью развития регионов арктической зоны РФ являются: 1) разработка принципов формирования и реализация единого информационного пространства арктических регионов, сформированного с учетом специфических особенностей арктической зоны РФ; 2) создание благоприятных условий для реализации концепции

приемлемого риска, достижимого и оправданного (допустимого) с точки зрения социально-экономических и экологических факторов обеспечения безопасности развития; 3) разработка комплекса когнитивных методов, программных средств и технологий формирования открытой расширяемой информационно-аналитической среды поддержки проблемно-ориентированной деятельности организационных структур в области обеспечения безопасности функционирования региональных подсистем; 4) поэтапное формирование системы комплексной безопасности для защиты территорий, населения и критически важных для национальной безопасности объектов арктической зоны РФ от угроз чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и др.

Для эффективного решения перечисленных задач необходимо как методическое, так и информационное обеспечение. Применяемые в настоящий время решения в исследуемой проблемной области, основанные на использовании передовых информационных технологий, ориентированы на решение частных задач управления безопасностью развития отдельных региональных подсистем, носят бессистемный и локальный характер и не обеспечивают достижение комплексного эффекта при решении рассматриваемого класса задач. Единая методологическая база для исследования и решения проблем управления безопасностью регионального развития может быть получена на основе комбинирования различных научных концепций, информационных технологий и инструментов моделирования, таких как концептуальное моделирование, теория самоорганизации, мультиагентные технологии, системная динамика, математическая теория безопасности и риска, методы анализа устойчивости нелинейных динамических систем, теория управления сложными динамическими системами в условиях неопределенности, методы системного моделирования сложных неоднородных систем и т.д.

Для описания структуры и специфики задач обеспечения безопасности регионального развития предложен когнитивный подход, основанный на технологии концептуального моделирования. Технология обеспечивает комплексное формальное представление знаний о структуре предметной области исследования, унифицированное математическое описание безопасности регионального развития, а также представление решаемых задач и исполнительной среды информационно-аналитической поддержки. Большой потенциал в применении к задаче управления безопасностью регионального развития имеют метод и технологии системной динамики с точки зрения моделирования сложных процессов в социально-экономических системах, характеризующихся сложностью, новизной ситуаций, слабой формализованностью. Использование технологии мультиагентных систем позволяет создать адекватную среду информационно-аналитической поддержки управления безопасностью развития региона, учитывая распределенность, динамичность и структурную сложность образующих его подсистем. На интеллектуальных проактивных агентов могут быть возложены функции управления отдельными аспектами безопасности регионального развития, а на основе проблемно-ориентированных коалиционных взаимодействий агентов представляется возможным обеспечить эффективное функционирование самоорганизующейся инфраструктуры безопасности региона и ее отдельных компонентов, а также поддержание приемлемого уровня безопасности развития на перспективу.

В ходе исследований предложен подход к интеграции концептуального моделирования, мультиагентных технологий и системно-динамического моделирования, позволяющий получить качественно новые решения в области создания систем информационно-аналитической поддержки функционирования и управления развитием сложных динамических систем. Вместе с тем в ИИММ КНЦ РАН получены следующие научные результаты в области информационно-аналитической поддержки управления региональным развитием [1, 2], которые также могут служить базисом для решения задач управления комплексной безопасностью развития региона.

- В направлении решения задач поддержки управления экономической и социальной безопасностью развития региона разработаны и реализованы средствами имитационного моделирования Powersim и Anylogic комплексы системно-динамических и агентных моделей основных компонентов региональной социально-экономической системы, включающие модели системной динамики трудовых ресурсов региона и демографии, модели рыбопромышленного комплекса и продовольственной безопасности, модели для поддержки принятия решений в кадровой политике региона и др.
- В направлении решения задач поддержки управления безопасностью развития информационно-коммуникационной инфраструктуры региона разработаны методы и модели прогнозирования развития региональных информационно-коммуникационных систем с учетом социально-экономических факторов, а также модели динамики перспективных информационных потребностей региона.
- В направлении решения задач поддержки управления научно-инновационной безопасностью разработаны методы и средства синтеза имитационных моделей на основе онтологических описаний для прогнозирования развития регионального научно-образовательного комплекса, методы и технологии комплексного информационно-аналитического обеспечения управления инновационным развитием региональной экономики.
- В направлении решения задач обеспечения промышленно-экологической безопасности разработана система информационной поддержки управления безопасностью промышленно-природных комплексов Мурманской области.

Полученные результаты обеспечивают достаточный научный задел для эффективного решения задач информационной поддержки управления безопасностью развития регионов арктической зоны РФ.

1. Емельянов С.В., Попков Ю.С., Олейник А.Г., Путилов В.А. Информационные технологии регионального управления. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 400 с.
2. Путилов В.А., Горохов А.В. Системная динамика регионального развития. – Мурманск: НИЦ «Пазори», 2002. – 306 с.

***Маслобоев Андрей Владимирович*** – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, кандидат технических наук, доцент, докторант, masloboev@iimm.kolasc.net.ru
***Путилов Владимир Александрович*** – Институт информатики и математического моделирования технологических процессов Кольского научного центра РАН, доктор технических наук, профессор, директор, putilov@iimm.kolasc.net.ru

# SUMMARY

## 1. OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES

### OPTICAL ELECTRONIC COMPLEX OF HEIGHTENED PRODUCTIVITY

**A. Demin, A. Denisov, I. Pearl, A. Tret'yakova**

Optical electronic complex of remote sounding of the Earth with heightened productivity and efficiency is described.

**Keywords:** optical electronic complex, remote sounding of the Earth, FPZS-ruler.

*Anatoly Demin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, dav_60@mail.ru

*Andrey Denisov* – LOMO PLC, Postgraduate, www.denisoff@mail.ru

*Ivan Pearl* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, j-pearl@mail.ru

*Anastasia Tret'yakova* – LOMO PLC, Postgraduate, tretyakovaa_17@mail.ru

### APPLICATION POSSIBILITY ANALYSIS OF MULTISPECTRAL METHOD FOR AIR CHANNEL INFLUENCE MINIMIZATION IN OPTICAL-ELECTRONIC TARGET ATTITUDE CONTROL SYSTEMS

**O. Lashmanov, A. Pantyushin, A. Timofeev, S. Yaryshev**

Availabilities of the active target image coordinate estimation in blue, green and red spectral regions are considered. The receiver is constructed according to the Bayer filter mosaic.

**Keywords:** multispectral method, optical-electronic system, coordinates estimation for the reference mark images.

*Oleg Lashmanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, o.lashmanov@gmail.com

*Anton Pantyushin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, pantyushin@ya.ru

*Alexander Timofeev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of laboratory, PhD, senior staff scientist, timofeev@grv.ifmo.ru

*Sergey Yaryshev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, ysn63@mail.ru

### SPECTRAL SENSITIVITY CORRECTION OF THE UV RADIOMETER BY SPECTRAL PHOTOMETRIC METHOD

**V. Antonov, G. Ishanin**

The article deals with the measuring possibility of spectral zonal energy efficient values in the ultraviolet region, based on the spectral composition measuring of the investigated source with subsequent computer processing of information. The traditional solution of these problems is associated with the creation of a broad range of spectral zonal devices having individual spectral sensitivity characteristics. Spectral sensitivity correction of photo detectors used in such devices is often not a simple task, which leads to the unjustified rise in prices for the instrument as a whole. The proposed method of multispectral irradiance determination of the objects in any given spectrum region seems to be promising.

**Keywords:** multispectral method, spectral photometric method, the effective values, polychromator.

*Vladimir Antonov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, snoop_85@mail.ru

*Gennady Ishanin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, Ishanin@mail.ru

### OPTICAL ELECTRONIC INFORMATION PROCESSING IN PNEUMATIC OPTICAL TONOMETER

**K. Kuznetsov, Yu. Nagibin, V. Trofimov, S. Alexeev**

Optical electronic information processing method for pneumatic optical non-invasive intraocular pressure measurement is developed. Limitation analysis for measuring scheme realization during harmonic deformation of eye cornea is done.

**Keywords:** intraocular pressure, eye cornea, tonometer, glaucoma.

*Konstantin Kyznetsov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ckyznetsov@gmail.com

*Yuri Nagibin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, nagibin77@mail.ru

*Vladimir Trofimov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, troftu@mail.ru
*Sergey Alexeev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, asast@mail.ru

## 2. PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS

### RAYLEIGH-TAYLOR INSTABILITY OF A DUSTY GAS

**R. Savelyev, N. Rozanov, G. Sochilin, S. Chivilikhin**

Interface instability of «gas+dust» system was explored. A numerical solution of the dispersion equation, connecting the perturbation wave numbers and its growth rates was found. It was shown that dust density decreasing, as well as the size of the dust particles increasing, reduces the rate of the instability evolution. The gas viscosity was shown to decrease the rate of perturbation growth with large wave numbers.
**Keywords:** Rayleigh-Taylor instability, sedimentation, dispersion equation, viscosity.
*Roman Savelyev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, savelyev.r.s@gmail.com
*Nikolay Rosanov* – Federal State Unitary Enterprise Research-and-Production Corporation "S.I. Vavilov State Optical Institute", Head of division, D.Sc., Professor, nrosanov@yahoo.com
*George Sochilin* – Federal State Unitary Enterprise Research-and-Production Corporation "S.I. Vavilov State Optical Institute", leading scientist, PhD, senior scientist, goga.ilph@yahoo.com
*Sergey Chivilikhin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, senior scientist, sergey.chivilikhin@gmail.com

### LOW-TEMPERATURE MEASUREMENTS OF UP-CONVERSION LUMINESCENCE IN NANOSTRUCTURED DOPED GLASS-CERAMICS

**V. Aseev, E. Kolobkova, Y. Nekrasova**

The luminescent properties of lead-fluorosilicate nanostructured glass-ceramics doped with ytterbium and erbium ions have been investigated. Luminescence spectra in visible and near infrared range at room (300 K) and low (77 K) temperatures have been measured at 975 nm wave length pumping. The glass-ceramics luminescence spectra dependences on the secondary heat treatment time and sample temperature have been obtained.
**Keywords:** luminescent properties, rare-earth ions, low temperatures.
*Vladimir Aseev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Assistant, Aseev@oi.ifmo.ru
*Elena Kolobkova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Kolobok106@rambler.ru
*Yana Nekrasova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, Nekrasova@oi.ifmo.ru

### NONLINEAR OPTICAL RESPONSE OF POTASSIUM-ALUMINUM-BORATE GLASSES WITH NANOCRYSTALS OF COPPER HALIDES

**A. Kim, N. Nikonorov, A. Sidorov, V. Tsekhomsky**

An experimental study of nonlinear optical properties of potassium- aluminum-borate glasses with nanocrystals of CuCl and CuBr in the nanosecond range at 532 nm wavelength is done. It is shown that the nonlinear optical response is manifested as a loss of radiation, has a threshold and occurs in two ranges of laser pulse energy: 10-10…10-8 J and 10-4…10-2J. A comparison of the nonlinear characteristics of glasses with nanocrystals CuCl, CuBr is given and models explaining the observed effects are proposed.
**Keywords:** potassium- aluminum-borate glass, nanocrystal, copper chloride, copper bromide, the nonlinear optical response.
*Alexander Kim* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, postgraduate, kimalexandr@yandex.ru
*Nikolay Nikonorov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, Nikonorov@oi.ifmo.ru
*Alexander Sidorov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Professor, aisidrorov@qip.ru
*Viktor Tsekhomsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D. Sc., Professor, kimalexandr@yandex.ru

### KINETICS OF CHEMICAL ETCHING OF PHOTO-THERMO-REFRACTIVE GLASS AND NANOGLASS CERAMICS

**A. Ignatiev, N. Nikonorov, M. Sorokina**

Etching kinetics of initial photo-thermo-refractive glass and nanoglass ceramics in HF solutions at various concentrations and temperatures has been investigated for the first time. It has been shown that the etching rate

of the nanoglass ceramics is ten times higher than of the glass. Future prospects of the PTR glass and chemical etching technology for fabrication of photonics and mechatronics elements have been discussed.
**Keywords:** photo-thermo-refractive glass, nanoglass ceramics, chemical etching.
*Alexander Ignatiev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Laboratory head, researcher, ignatiev@oi.ifmo.ru
*Nikolay Nikonorov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department head, D.Sc., Professor, Nikonorov@oi.ifmo.ru
*Marina Sorokina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, ovenka100@mail.ru

### OPTIMIZATION OF QUADROTREE IMAGE SEGMENTATION BASED ON MINIMUM DESCRIPTION LENGTH CRITERION IN FRACTAL COMPRESSION

**V. Okunev, A. Potapov**

Efficiency of quadrotree image segmentation in fractal compression methods is investigated. Information criterion of rang blocks division into sub-blocks is introduced based on the minimum description length principle. It is shown that the modified method of quadrotree segmentation results in simultaneous increase of compression ratio and quality of reconstructed image in comparison with conventional methods based on root-mean-square error threshold criterion.
**Keywords:** fractal compression, images compression, minimum description length, quadrotree, optimization.
*Vadim Okunev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research worker, vadik-okunev@yandex.ru
*Alexey Potapov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., pas.aicv@gmail.com

### ANALYSIS OF EXTRACTION METHODS FOR MOVING OBJECTS ON VIDEO SEQUENCES WITH NOISE

**V. Kozlov, A. Potapov**

The article provides an overview of the most commonly used extraction methods for moving objects in relation to video recordings obtained with ordinary household video cameras and containing noise. Main processing problems of such video sequences are revealed, and ways of solving them and improving the overall quality of the result are suggested.
**Keywords:** movement analysis, contour, object extraction, segmentation.
*Vadim Kozlov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, vadikus@mail.ru
*Alexey Potapov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., pas.aicv@gmail.com

## 3. ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS

### EXPONENTIAL STABILITY OF CONTINUOUS DYNAMIC SYSTEMS

**S. Bystrov, V. Grigoriev, Ye. Rabysh, N. Cherevko**

Analytical algorithm of optimal controllers synthesis is considered providing exponential stability to the synthesized continuous nonstationary dynamic system, that is the possibility to set the desirable transition time.
**Keywords:** exponential stability, optimal controllers design, continuous nonstationary systems, quality scores.
*Sergey Bystrov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, sbystrov@mail.ru
*Valeriy Grigoriev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, igvv@yandex.ru
*Yevgeniy Rabysh* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Rabysh@yandex.ru
*Nikolay Cherevko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, epostbox1@mail.ru

### SPEED AND TORQUE CONTROL OF GATE MOTOR IN VEHICLE DRIVE GEAR

**A. Gromysheva, I. Ovchinnikov, A. Egorov**

The article deals with oscillatory processes for speed and current, originating from relay control of gate motor with linear feedback for rotor speed and stator current. The ability of smooth management of the average speed and torque in the time of high rigidity of artificial mechanical characteristics and current limit in the transient regimes is shown.
**Keywords:** gate motor, relay control, drive gear, speed, torque.
*Anastasia Gromysheva* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, sinderella88@mail.ru
*Igor Ovchinnikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, oveni77@yandex.ru

*Alexey Egorov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, alexeykey@rambler.ru

### UNSTEADY HEAT MEASUREMENT SENSORS AND THEIR MATHEMATICAL MODELS

**N. Pilipenko**

The article deals with the main directions and objects of applied heat flux measurements; mathematical models of unsteady heat flux transducers, widely tested in experimental studies of power-intensive processes, are given.

**Keywords:** methods of heat flux measurements, mathematical models, direct and inverse heat conduction problems.

*Nikolay Pilipenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., pilipenko38@mail.ru

## 4. MECHANICS AND MECHATRONICS

### DYNAMIC CHARACTERISTICS OF SPINDLE HYDROSTATIC BEARINGS USING DIAPHRAGM REGULATORS

**V. Prokopenko, I. Chernov**

The dynamic behavior of spindle hydrostatic bearings is considered. Mathematical model of hydrostatic bearing is given. Possibilities of regulators implementation are considered as one of the effective ways to improve the vibration stability. Sampling method is suggested to choose parameters of correcting RC-circuits. Transient processes at different operating regimes are calculated, corresponding linear-frequency characteristics are made.

**Keywords:** hydrostatic bearing, spindle unit, vibration stability, dynamic performance, membrane regulator, RC-correction.

*Vyacheslav Prokopenko* – Saint Petersburg State Polytechnic University, lecturer, PhD, Associate professor, prokopenko@gak.spb.su

*Ivan Chernov* – Saint Petersburg State Polytechnic University, lecturer, PhD, chernov@gak.spb.su

### SPACESHIP ROTATORY MOVEMENT CONTROL IN VIEW OF VARIABLE MASS DISTRIBUTION

**V. Korolev, R. Kravchuk**

The article deals with the problem of rotatory movement control relative to mechanical system center of masses consisting of the main body and other bodies or particles which can move relatively the main body or change the mass, defining variable mass distribution and additional change of the kinetic moment. The equations of dynamics are received, which can be investigated by analytical or numerical methods.

**Keywords:** control, rotatory movement, spaceship, gyroscopes, variable mass distribution, gravitation field.

*Vladimir Korolev* – Saint Petersburg State University, Associate professor, PhD, Associate professor, vokorol@bk.ru

*Raisa Kravchuk* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, ggarotta@gmail.com

### THE EVALUATION ALGORITHM OF THE EFFICIENT GROUPING OF THE LOW-ORBIT SATELLITES FOR THE GROUND OBJECTS MONITORING

**A. Pikul, D. Hegai, A. Shpak**

The article is devoted to the algorithm for evaluating of the information resources of the space system in its various orbital grouping in view of its artificial Earth satellites specifications and monitoring objects.

**Keywords:** an artificial Earth satellite, the space system, the efficient orbital grouping of artificial Earth satellites (AES), monitoring of the ground objects.

*Anatoliy Pikul* – Federal State Unitary Enterprise “Central Science and Research Institute of Radio Engineering” (CNIRTI) named after academician A.I. Berg, Deputy director, post@cnirti.ru

*Dmitry Hegai* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Division head, PhD, senior scientific researcher, hdk_2004@mail.ru

*Alexander Shpak* – Federal State Unitary Enterprise “Central Science and Research Institute of Radio Engineering” (CNIRTI) named after academician A.I. Berg, Chief designer, PhD, Juls_s@inbox.ru

## 5. INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION

### SYSTEM INTEGRATION IN MODELING AND MANUFACTURING OF PRODUCTS IN THE EXTENDED ENTERPRISE ENVIRONMENT

**A.Gribovsky**

The article is devoted to interaction features within the extended enterprise throughout the product lifecycle. Correct way of data transmission between participants in the extended enterprise is described.

**Keywords:** extended enterprise, interfaces of three-dimensional models, data transmission formats.

*Andrey Gribovsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, griandrey@yandex.ru

### SELECTION PROCEDURES FOR QUEUES CONSTRUCTION OF EQUIPMENT SERVICE

**G. Shkurina**

Queues planning technique of equipment service by means of selection procedures is described. Optimal queues of the equipment to be repaired are formed on the basis of objective criteria without metrics introduction. Such approach during service plans creation gives the possibility of building queues in view of equipment repairability characteristics with various degree of information completeness.

**Keywords:** planning of equipment service queues, decision methods, metric selection methods, computer-aided equipment service system.

*Galina Shkurina* – Volgograd State Technical University, Senior lecturer, PhD, Associate professor, shgl@bk.ru

### ANALYSIS OF ENGINEERING PRODUCTS CONTROL RESULTS BY ACOUSTIC EMISSION METHOD

**N. Luzina**

Classification of acoustic emission (AE) sources during industrial object control is one of the most important and principle technological operations of acoustic method. The basic estimation criteria of acoustic emission sources are considered. Results of experimental data analysis show compliance with estimated criteria at repeated acoustic stressing; also the intensity results of acoustic emission impulses at the full test are given.

**Keywords:** acoustic emission, the stressing schedule, criteria of acoustic emission, pressure, converters (gauges) of acoustic emission.

*Natalia Luzina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, bagiran@mail.ru

## 6. COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES

### VISUALIZATION OF MARINE OBJECT'S DYNAMICS IN WIDE-SCREEN VIRTUAL REALITY SYSTEMS

**A. Bezgodov, A. Zagarskikh, A. Boukhanovsky**

The features of computer simulation and interactive visualization of marine object's dynamics in irregular heavy sea are considered in frame of investigative design in shipbuilding on the base of wide-screen virtual reality system of SPbSU ITMO.

**Keywords:** interactive visualization, stereo-image, camera-oriented grids, morphological smoothing.

*Alexey Bezgodov* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, junior research fellow, demiurghg@gmail.com

*Alexander Zagarskikh* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, alazar.az@gmail.com

*Alexander Boukhanovsky* – Science-Intensive Research Institute of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Director, D.Sc., Professor, avb_mail@mail.ru

### SPATIAL ALGORITHMS OF IMAGE CODING

**E. Kolesnikov, E. Kostikova**

The approach to representation and processing of images on the basis of recursive reference points searching is considered in view of compression and use of two-dimensional interpolation at image restoration. The example of reference points searching algorithm is given.

**Keywords:** recursion, reference points, polygon, polygonal grid.

*Evgeniy Kolesnikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, evgeniy777.84@gmail.com

*Elena Kostikova* – Saint Petersburg State University of Water Communications, lecturer, Kostikovaev@mail.ru

### VARIANTS RESEARCH OF LIFTING SCHEME PREDICTION STAGE REALIZATION WHEN SOLVING THE SOUND COMPRESSION TASK

**E. Piunovsky**

Comparison of different realizations for wavelet transform lifting scheme prediction stage on the basis of three different functions: Haar's, linear and polynomial – is carried out. An audio signal and financial time series are chosen as the analyzed data. The lifting scheme and the concise description of its main stages are presented. The results of different prediction variants are analyzed and their quantitative assessment is given. The conclusions about the function complexity influence on different types of signals prediction results are made.

**Keywords:** lifting, lifting scheme, prediction stage, wavelet, sound compression, audio signal.

*Evgeniy Piunovsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, Piunovsky evgpiun@gmail.com

### OPERATION MODELING OF PSEUDO NETWORK DATABASE IN MS ACCESS BY SMALL BUSINESS SALES DEPARTMENT EXAMPLE

**S. Makarov, S. Boronenko, A. Korobeinikov**

The article describes the problems and characteristics of Access network databases in accordance with the specific subject area. Architecture for database construction is proposed. Data migration across all nodes of the

constructed model of pseudo-network database version is simulated. Model dynamics is analyzed. The effectiveness of the created model is shown by the example of small business sales department.
**Keywords:** modeling, network databases, network architecture, MS Access, file-server architecture, AllFusion Process Modeller, IDEF0 notation.
*Sergey Makarov* – Leningrad State University named after A.S. Pushkin, Postgraduate, immoral-idiom@rambler.ru
*Tatiana Boronenko* – Leningrad State University named after A.S. Pushkin, Department head, D.Sc., Professor, tataleks@mail.ru
*Anatoly Korobeynikov* – Saint Petersburg Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (SPbRC RAS), Deputy director for science, Professor, D.Sc., Professor, Korobeynikov_A_G@mail.ru

### QUALITY PROVIDING TASKS OF INFORMATION TRANSMISSION IN DTN NETWORKS

**B. Krylov, A. Kurnikov**

A short reasoning for the research necessity in the field of telecommunication networks service quality, and Delay-Tolerant Networks (DTNs) in particular, is given. The main differences in protocols used in traditional networks and DTNs are described. The problem of standard protocol application in DTNs is described. The questions to be answered in the future researches in this field to increase the DTN service quality are formulated.
**Keywords:** Delay-Tolerant Networks, networks reliability, data transmission channels delays.
*Boris Krylov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, Associate professor, krylovb@mail.ru
*Arseniy Kurnikov* – Aalto University, Finland, scientific researcher, arseny07@mail.ru

### DESIGN METHOD OF THE THREE-DIMENSIONAL PRINTED-BOARD ASSEMBLY

**O. Kuznetsova, E. Romanova**

Design method of the three-dimensional printed-board assembly by solid form-factors is suggested. The conclusion is done about increasing possibility of CAD efficiency for printed-board assemblies by layout speed growth and computing optimization.
**Keywords:** printed circuit board design, three-dimensional modeling, CAD, solid-state modeling, layout.
*Olga Kuznetsova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, olunchik_1989@mail.ru
*Eva Romanova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, eva_rom@mail.ru

## 7. INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS

### MITIGATION OF RISKS FOR SOFTWARE TO FAIL AFTER UPDATES OR FUNCTIONALITY CHANGES

**S. Arustamov, M. Genin**

The article deals with software update strategy based on the so-called elementary updates. Comparative analysis of software update process based on elementary update approach and the update process without elementary update approach is given. Validity of such software update approach based on elementary updates is proved to mitigate the risk of information system failure after updating. An example is provided to illustrate better efficiency of elementary update approach.
**Keywords:** information systems, update, update management, update strategy, elementary update, probability of success, risk of failure.
*Sergey Arustamov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, sergey.arustamov@gmail.com
*Mikhail Genin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, gmg@rambler.ru

### FUNDAMENTALS OF SAFETY AND SECURITY ENSURING CONCEPT

**V. Volkhonskiy**

Main risks and threats are analyzed on the basis of general approach to safety and security problem. Basic principles of integrated automation, security and safety systems development and list of necessary information are formulated, and main questions of direct and indirect effectiveness are considered.
**Keywords:** threats, risks, safety, security, integrated system.
*Vladimir Volkhonskiy* - ZAO Honeywell, Security Sales Leader, PhD, Associate professor, volkhonski@mail.ru

## 8. NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION

### AUTOMATED SYSTEM FOR PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCHOOL

**D. Varenikov, G.Luk'yanova**

This article is devoted to an automated system for physical-mathematical school of Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics. It deals with the system functionality directed to

quality improvement of the educational process organization. Necessity substantiation of such system is done and advantage of the given system over analogues is noticed.
**Keywords:** automated system, physical and mathematical school, DBMS, Internet, e-zine, message exchange, schedule.
*Denis Varenikov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, vardenis@inbox.ru
*Galina Luk'yanova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of postgraduate department, PhD, gal-lou@yandex.ru

### STAND DEVELOPMENT FOR EXPERIMENTAL RESEARCH OF ACADEMICNT DEPLOYMENT DIAGRAMS

**A. Skshidlevsky, A. Lyamin**

A stand for the research of learning management system AcademicNT deployment diagrams is described. The stand is based on virtualization technology and allows simplifying the system deployment mechanism and experiments with its models for efficiency increase and costs minimization. Models of learning management system are constructed based on data obtained by experiments with the stand. These models are used for the determination of hardware capacity in the case of system functioning with a given load.
**Keywords:** virtualization technology, modeling, simulation model.
*Anton Skshidlevsky* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, anton@cde.ifmo.ru
*Andrey Lyamin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Head of Distance Learning Center, PhD, Associate professor, lyamin@mail.ifmo.ru

## 9. ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT

### CHARACTERISTICS OF ECONOMIC BEHAVIOR OF THE ART MARKET PLAYERS

**O. Vasyukhin, O. Tararukhina**

The article deals with the key characteristics of economic behavior of the art market players, empirically collected. Key characteristics for the main types of the market players are presented, as well as the main methods of promotion and distribution for the contemporary pieces of art.
**Keywords:** investment, economic model, value, communication.
*Oleg Vasyukhin* –- Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, PhD, Professor, prof-vov52@mail.ru
*Olga Tararukhina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, tararukhina@gmail.com

### MODERN DEVELOPMENT PROBLEMS OF WORLD MARKET OF INTELLECTUAL PROPERTY OBJECTS

**A. Dayub, N. Kurkina**

Currently, exchange of technologies exceeds traditional economic flows of goods, services and capital. But still developing countries are continuing to trade with technologies, not protected by intellectual property rights. It reduces the income of those countries and slows the pace of development of IP objects world market. The article presents the criteria of appropriate legal protection of intellectual activity in the world technology market and the main development problems of IP objects world market.
**Keywords:** intellectual property, world market of intellectual property objects, world market problems of intellectual property objects.
*Anastasiya Dayub* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, anastasiya.dayub@gmail.com
*Natalia Kurkina* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, gav-kitten@yandex.ru

## BRIEF REPORTS

### ON CONTROL PROBLEM FOR UNKNOWN LINEAR PLANT WITH INPUT DELAY

**A. Bobtsov, A.Pyrkin**

The idea of a stabilizing controller design by an output variable for a linear plant with unknown parameters and the input delay is discussed.
**Keywords:** output control, system with input delay, stabilization.
*Alexey Bobtsov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optic, Dean, D.Sc., Professor, bobtsov@mail.ifmo.ru
*Anton Pyrkin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optic, Assistant, PhD, a.pyrkin@gmail.com

**ESTIMATION AND CHOICE OF FIREWALL FAULT-TOLERANT CONFIGURATIONS**

**V. Bogatyrev, S. Fokin, M. Popova**

Reliability and productivity estimation of firewall reservation variants is offered in the system including entrance switching knots levels, network screens, internal switching knots and groups of servers.

**Keywords:** reliability, productivity, fault tolerance, firewalls.

*Vladimir Bogatyrev* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optic, Professor, D.Sc., Vladimir.bogatyrev@gmail.com)
*Sergey Fokin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, tacit@list.ru
*Marina Popova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, marina24-09@mail.ru

**ORGANIZATION OF WORK AREA LIGHTING FOR INDUSTRIAL OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF COLOR ANALYSIS**

**E. Gorbunova, V. Peretyagin, A. Chertov**

Working area lighting organization features for the optical-electronic vision systems for industrial use from the standpoint of solving the color analysis problem are considered. A realization concept of the radiation source, formed by additive mixture of light-emitting diodes of different colors, with a controlled chromaticity is proposed.

**Keywords:** color analysis, optical-electronic system, radiation source, additive mixture.

*Elena Gorbunova* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, staff scientist, PhD, vredina_ia@mail.ru
*Vladimir Peretyagin* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, student, peretyagin@mail.ru
*Alexander Chertov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Associate professor, PhD, a.n.chertov@mail.ru

**GENERALIZED COMPUTER MODEL STRUCTURE FOR THE OPTICAL ELECTRONIC GONIOMETERS**

**M. Anderson**

The features of the generalized computer model for the optical electronic goniometers are considered.

**Keywords:** computer model, optical electronic goniometer, block diagram.

*Mariya Anderson* – Moscow State University for Geodesy and Cartography, Postgraduate, m-anderson@yandex.ru

**LIQUID LEVEL GAUGE ON THE BASIS OF FIBER-OPTICAL SENSOR**

**A. Kiyanov, V. Tkalich, A. Volchenko**

The article deals with drawbacks of existing amplitude fiber-optical sensors, as well as methods of signal processing and problems of the error theory. Modified fiber-optical sensor with reference channel is suggested.

**Keywords:** fiber-optical sensor, the measuring channel, sensitive membrane element.

*Alexander Kiyanov* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, resever-k@yandex.ru
*Vera Tkalich* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Professor, D.Sc., Professor, studsovet_itmo@mail.ru
*Alexander Volchenko* – Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Postgraduate, wolf2684@mail.ru

**INFORMATION AND ANALYTICAL SUPPORT FOR SECURITY MANAGEMENT OF THE RUSSIAN FEDERATION ARCTIC REGIONS DEVELOPMENT: PROBLEMS, METHODS, TECHNOLOGIES**

**A. Masloboev, V. Putilov**

Integrated methodological research base and approaches to information and analytical support problems solution for the complex security management of the Russian Federation Arctic regions development (by the example of Murmansk region) based on simulation and cognitive information technologies have been proposed.

**Keywords**: cognitive information technologies, management, security, regional development, simulation.

*Andrey Masloboev* – Establishment of the Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, PhD., Associate professor, masloboev@iimm.kolasc.net.ru
*Vladimir Putilov* – Establishment of the Russian Academy of Sciences Institute for Informatics and Mathematical Modeling of Technological Processes of the Kola Science Center RAS, Director, D.Sc., Professor, putilov@iimm.kolasc.net.ru

*Уважаемые читатели!*

«Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» издается с 2001 года как периодическое научное и научно-образовательное издание. Журнал входит в утвержденный Высшей Аттестационной комиссией «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук». Все публикации в журнале проходят рецензирование. Периодичность издания составляет 6 выпусков в год, объем каждого выпуска - 120 страниц.

Журнал печатает материалы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения и новых информационных технологий в России и за рубежом по следующим направлениям: информационные технологии, информационно-телекоммуникационные системы, элементы и устройства вычислительной техники и систем управления, системный анализ и математическое моделирование, системы автоматизированного проектирования, оптика, оптотехника и приборостроение, физика твердого тела, микроэлектроника, нанотехнологии, мехатроника, методы и системы защиты информации, биомедицинские технологии, экономика и финансы.

Издание зарегистрировано как сериальное в Международном центре ISSN, номер ISSN 1819-222X, свидетельство МНС РФ 1027806868154 от 24 января 2005 года, а также в Федеральной службе по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ ФС77-33466 от 10 октября 2008 года.

На журнал «Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО» можно оформить подписку в любом отделении связи, а также в редакции журнала (Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49, комн. 330). Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать (Газеты. Журналы).

Сайт журнала http://books.ifmo.ru/ntv/

# ПРАВИЛА ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ

## ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Редакция принимает к рассмотрению оригинальные (нигде ранее не опубликованные, за исключением материалов научных конференций) работы по тематике журнала, представляющие новые научные результаты, полученные лично авторами статьи. Публикуются также обзоры, характеризующие современное состояние актуальных направлений развития науки и техники, сообщения о научных конференциях, материалы научных дискуссий и рецензии на новые книги.

Тематика журнала включает разделы, отражающие достижения науки, техники и технологии в области современного приборостроения по направлениям: оптика, оптические системы и технологии, оптическое материаловедение и нанотехнологии, информационные и компьютерные системы и технологии, методы и системы защиты информации, системный анализ, системы автоматического управления, мехатроника, системы автоматизированного проектирования, микроэлектроника, биомедицинские технологии. В качестве дополнительных разделов журнал также публикует работы по экономике и финансам.

Материал статьи должен быть изложен в соответствии со следующей структурой.

В аннотации, рассчитанной на самый широкий круг читателей, необходимо кратко (объемом до 100 слов) изложить научное содержание статьи.

Во введении необходимо представить содержательную постановку рассматриваемого вопроса, краткий анализ известных из научной литературы решений, критику их недостатков и преимущества (особенности) предлагаемого подхода.

В основном тексте статьи должна быть представлена строгая постановка решаемой задачи, изложены и обстоятельно разъяснены (доказаны) полученные утверждения и выводы, приведены результаты экспериментальных исследований или математического моделирования, иллюстрирующие сделанные утверждения. Основной текст статьи может быть разбит на отдельные разделы: «Постановка задачи», «Основной результат», «Результаты моделирования» и т.п.

В заключении необходимо кратко сформулировать основные результаты, прокомментировать их и, если возможно, указать направления дальнейших исследований.

Все статьи проходят процедуру рецензирования. После ее завершения автору направляется экземпляр рукописи с замечаниями рецензента и научного редактора для доработки. При опубликовании статьи указываются даты ее поступления и последующих переработок.

## ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Объем статьи, включая иллюстрации, таблицы и список литературы, не должен превышать 6 страниц.

Оригинал-макет статьи выполняется в редакторе Word for Windows. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 pt, межстрочный интервал одинарный, поля сверху 20 мм, остальные поля 25 мм. Абзацный отступ 10 мм.

Аннотация печатается шрифтом Times New Roman 10 обычный, межстрочный интервал одинарный, выравнивается по ширине страницы. В аннотации не допускаются ссылки на цитированную литературу и громоздкие формулы.

Название раздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, отделяется от предыдущего раздела полуторной пустой строкой, а от последующего текста одной пустой строкой.

Название подраздела печатается шрифтом Times New Roman 12 полужирный, межстрочный интервал одинарный, пустыми строками не отделяется.

Формулы набираются в редакторе Microsoft Equation Ed. 3.0. Параметры стиля: текста — Times New Roman, прямой; функции — Times New Roman, прямой; переменной — Times New Roman, наклонный; греческих букв — Symbol, прямой; символов — Symbol, прямой; матрицы-вектора — Times New Roman, прямой, полужирный; чисел — Times New Roman, прямой. Размеры: обычный — 12 pt, крупный индекс — 10 pt, мелкий индекс — 8 pt, крупный символ — 16 pt, мелкий символ — 12 pt. Отдельные переменные в тексте допускается набирать в текстовом режиме с соблюдением требований, указанных для формул. Разделительный знак десятичных дробей — запятая.

При оформлении рисунков и графиков используется шрифт Times New Roman. Стиль написания переменных должен соответствовать требованиям к основному тексту.

Используются только единицы измерения, соответствующие системе СИ.

Список использованной литературы оформляется в соответствии с ГОСТ 7.0.5-2008. Нумерация позиций — согласно очередности ссылок в тексте.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

**Более подробную информацию смотрите на сайте http: //books.ifmo.ru/ntv/**

Подписано к печати 15.04.2011 Тираж 350 экз. Заказ № 21(73)

Отпечатано в учреждении «Университетские телекоммуникации»
Адрес: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций, свидетельство ПИ № ФС77-33466 от 10.10.2008 г.
Подписной индекс 47 197 по каталогу агентства Роспечать
(Газеты. Журналы)

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,МЕХАНИКИ И ОПТИКИ



**OPTICAL AND OPTICAL ELECTRONIC SYSTEMS. OPTICAL TECHNOLOGIES**

Optical electronic complex of heightened productivity — *A. Demin, A. Denisov, I. Pearl, A. Tret'yakova* — *1*

Application possibility analysis of multispectral method for air channel influence minimization in optical-electronic target attitude control systems — *O. Lashmanov, A. Pantyushin, A. Timofeev, S. Yaryshev* — *5*

Spectral sensitivity correction of the UV radiometer by spectral photometric method — *V. Antonov, G. Ishanin* — *9*

Optical electronic information processing in pneumatic optical tonometer — *K. Kuznetsov, Yu. Nagibin, V. Trofimov, S. Alexeev* — *14*

**PHOTONICS AND OPTICAL INFORMATICS**

Rayleigh-Taylor instability of a dusty gas — *R. Savelyev, N. Rozanov, G. Sochilin, S. Chivilikhin* — *18*

Low-temperature measurements of up-conversion luminescence in nanostructured doped glass-ceramics — *V. Aseev, E. Kolobkova, Y. Nekrasova* — *22*

Nonlinear optical response of potassium-aluminum-borate glasses with nanocrystals of copper halides — *A. Kim, N. Nikonorov, A. Sidorov, V. Tsekhomsky* — *26*

Kinetics of chemical etching of photo-thermo-refractive glass and nanoglass ceramics — *A. Ignatiev, N. Nikonorov, M. Sorokina* — *29*

Optimization of quadrotree image segmentation based on minimum description length criterion in fractal compression — *V. Okunev, A. Potapov* — *34*

Analysis of extraction methods for moving objects on video sequences with noise — *V. Kozlov, A. Potapov* — *39*

**ANALYSIS AND SYNTHESIS OF COMPLEX SYSTEMS**

Exponential stability of continuous dynamic systems — *S. Bystrov, V. Grigoriev, Ye. Rabysh, N. Cherevko* — *44*

Speed and torque control of gate motor in vehicle drive gear — *A. Gromysheva, I. Ovchinnikov, A. Egorov* — 47

Unsteady heat measurement sensors and their mathematical models — *N. Pilipenko* — *53*

**MECHANICS AND MECHATRONICS**

Dynamic characteristics of spindle hydrostatic bearings using diaphragm regulators — *V. Prokopenko, I. Chernov* — *57*

Spaceship rotatory movement control in view of variable mass distribution — *V. Korolev, R. Kravchuk* — *62*

The evaluation algorithm of the efficient grouping of the low-orbit satellites for the ground objects monitoring — *A. Pikul, D. Hegai, A. Shpak* — *66*

**INSTRUMENT-MAKING TECHNIQUE. ORGANIZATION OF PRODUCTION**

System integration in modeling and manufacturing of products in the extended enterprise environment — *A.Gribovsky* — *71*

Selection procedures for queues construction of equipment service — *G. Shkurina* — *74*

Analysis of engineering products control results by acoustic emission method — *N. Luzina* — *78*

**COMPUTER SYSTEMS AND INFORMATION TECHNOLOGIES**

Visualization of marine object's dynamics in wide-screen virtual reality systems — *A. Bezgodov, A. Zagarskikh, A. Boukhanovsky* — *84*

Spatial algorithms of image coding — *E. Kolesnikov, E. Kostikova* — *88*

Variants research of lifting scheme prediction stage realization when solving the sound compression task — *E. Piunovsky* — *92*

Operation modeling of pseudo network database in MS Access by small business sales department example — *S. Makarov, S. Boronenko, A. Korobeinikov* — *96*

Quality providing tasks of information transmission in DTN networks — *B. Krylov, A. Kurnikov* — *102*

Design method of the three-dimensional printed-board assembly — *O. Kuznetsova, E. Romanova* — *105*

**INFORMATION SECURITY METHODS AND SYSTEMS**

Mitigation of risks for software to fail after updates or functionality changes — *S. Arustamov, M. Genin* — *111*

Fundamentals of safety and security ensuring concept — *V. Volkhonskiy* — *116*

**NEW TECHNOLOGIES IN EDUCATION**

Automated system for physical and mathematical school — *D. Varenikov, G.Luk'yanova* — *122*

Stand development for experimental research of AcademicNT deployment diagrams — *A. Skshidlevsky, A. Lyamin* — *126*

**ECONOMICS AND FINANCES. MANAGEMENT**

Characteristics of economic behavior of the art market players — *O. Vasyukhin, O. Tararukhina* — *130*

Modern development problems of world market of intellectual property objects — *A. Dayub, N. Kurkina* — *133*

**BRIEF REPORTS** — *138*

**SUMMARY** — *146*



© Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, 2011