

**Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН**

# **УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ**

***Выпуск 25***

**Июнь 2009**

**СБОРНИК  
ТРУДОВ**

ISSN 1819-2467

Регистрационный номер Эл №ФС77-27285 от 22.02.2007

**Москва – 2009**

[www.mtas.ru](http://www.mtas.ru)

## ИНТЕРНЕТ-сайт теории управления организационными системами

**ТЕОРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОРГАНИЗАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ**

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН



**Целью сайта** является предоставление специалистам по теории и практике управления организационными системами (ученым, преподавателям, аспирантам, студентам, а также реальным управленцам) доступа к ресурсам, отражающим современное состояние теории и возможности обмена идеями и результатами.

**На сайте имеются разделы:**

**Теория** – с обзором теории управления организационными системами, глоссарием, информацией для аспирантов;

**Практика** – с обзором результатов внедрения механизмов управления в реальных организациях;

**Библиография** – около 2500 публикаций по теории управления, снабжена классификатором и аннотациями;

**Электронная библиотека** – около 700 полнотекстовых монографий, статей и учебных пособий;

**а также многое другое.**

На сайте работает **форум**, на котором можно обсудить вопросы, относящиеся к математике, экономике, управлению организациями, узнать новости теории управления и ознакомиться с планируемыми конференциями и семинарами.

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ МУЛЬТИКОНФЕРЕНЦИЯ «УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ» (УБС'2009)**

**Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН** объявляет о проведении 17-19 ноября 2009 года Международной научно-практической Мультиконференции «Управление большими системами».

**В рамках Мультиконференции планируется проведение:**

1. Международной научно-практической конференции «Теория активных систем - 2009» (17-19 ноября);
2. VIII Международной конференции «Когнитивный анализ и управление развитием ситуаций» (CASC'2009) (17-19 ноября);
3. Круглого стола «Проблемы управления большими системами» (19 ноября).

**Заявка на участие** должна быть подана через сайт <http://www.mtas.ru/seminar/ubs2009> (далее – сайт) не позднее 1 сентября 2009 г. Контакты между Оргкомитетом и участниками будут осуществляться по электронной почте [ubs2009@ipu.ru](mailto:ubs2009@ipu.ru).

### **VI ШКОЛА-СЕМИНАР МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ «УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ»**

Проводится Институтом проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, сетью Научно-образовательных центров проблем управления и Удмуртским государственным университетом, с целью развития и пропаганды достижений теории и практики управления большими системами, методов системного и логического анализа таких систем.

Место и время проведения 31 августа–5 сентября 2009 г., г. Ижевск, база отдыха «Дзержинец».

Приглашаются к участию молодые ученые (студенты и аспиранты, кандидаты наук в возрасте до 35 лет, доктора наук – в возрасте до 45 лет).

Место и время проведения 31 августа–5 сентября 2009 г., г. Ижевск, база отдыха «Дзержинец».

Заявка и доклады должны быть направлены по электронному адресу школы [ubs2009@udsu.ru](mailto:ubs2009@udsu.ru) не позднее 1 августа 2009 г.

# ubs.mtas.ru

Интернет-сайт электронного периодического  
научного издания «Управление большими  
системами: сборник трудов»

## УПРАВЛЕНИЕ БОЛЬШИМИ СИСТЕМАМИ

ЭЛЕКТРОННЫЙ СБОРНИК НАУЧНЫХ ТРУДОВ  
ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ИМ. В.А. ТРАПЕЗНИКОВА РАН

С 1998 года Институт проблем управления РАН выпускает периодический сборник трудов ученых, занимающихся разработкой и исследованием математических моделей управления большими (социально-экономическими, организационными, организационно-техническими и др.) системами. Все статьи, публикуемые в сборнике, проходят рецензирование ведущими специалистами по теории управления.

С 2006 года сборник "Управление большими системами" вместе с ведущим журналом ИПУ РАН "Проблемы управления" – включены в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

С июля 2007 года Сборник входит в список ВАК (перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертации на соискание ученой степени доктора и кандидата наук):

- \* по управлению, вычислительной технике и информатике (для докторов наук);

- \* по электронике, измерительной технике, радиотехнике и связи; по энергетике (для кандидатов наук).

**Уважаемые коллеги! Приглашаем Вас опубликовать  
Вашу статью в очередном выпуске сборника  
"Управление большими системами"!**

Периодичность сборника - 4 раза в год. Время выхода статьи - 3-4 месяца. Плата с авторов за публикацию рукописей не взимается.

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК  
*Институт проблем управления*  
*им. В.А. Трапезникова*

**УПРАВЛЕНИЕ  
БОЛЬШИМИ  
СИСТЕМАМИ**

**СБОРНИК ТРУДОВ**

*Выпуск 25*

**Москва – 2009**

### **КООРДИНАЦИОННЫЙ СОВЕТ**

Академики РАН Васильев С.Н., Емельянов С.В., Коровин С.К., Куржанский А.Б., Федосов Е.А., Черноусько Ф.Л.; члены-корреспонденты РАН Желтов С.Ю., Каляев И.А., Меликян А.А., Пархоменко П.П., Попков Ю.С.; д-ра техн. наук, проф. Бутковский А.Г., Дорофеев А.А., Кузнецов О.П., Кульба В.В., Кротов В.Ф., Лотоцкий В.А., Павлов Б.В., Поляк Б.Т., Рутковский В.Ю.

### **РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ**

**Главный редактор:** Новиков Д.А. **Ответственный секретарь:** Губко М.В.

Д-ра техн. наук, проф. Алескеров Ф.Т. (ГУ ВШЭ), проф. Артамонов Е.И. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Архипова М.Ю. (ИПИ РАН), д-ра техн. наук, проф. Афанасьев В.Н. (МИЭМ), проф. Бахтадзе Н.Н. (ИПУ РАН), проф. Бурков В.Н. (ИПУ РАН), проф. Вишневецкий В.М. (ИППИ РАН), д-р экон. наук, проф. Голиченко О.Г. (ЦЭМИ РАН), д-р физ.-мат. наук, проф. Добровидов А.В. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук, проф. Заложнев А.Ю. (ИПУ РАН), проф. Земляков С.Д. (ИПУ РАН), проф. Ириков В.А. (МФТИ), проф. Калянов Г.Н. (ИПУ РАН), проф. Касаткин С.И. (ИПУ РАН), проф. Каравай М.Ф. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Клочков В.В. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук, проф. Кононенко А.Ф. (ВЦ РАН), проф. Курдюков А.П. (ИПУ РАН), проф. Лебедев В.Г. (ИПУ РАН), к-т техн. наук, доцент Лебедев В.Н. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Ловчиновский Э.В. (ИПУ РАН), д-р техн. наук, проф. Мандель А.С. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Нижегородцев Р.М. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук, проф. Новосельцев В.Н. (ИПУ РАН), проф. Орлов А.И. (МВТУ), канд. техн. наук Петрикевич Я.И. (ИПУ РАН), д-р физ.-мат. наук, проф. Рапопорт Л.Б. (ИПУ РАН), д-р техн. наук, проф. Рыков А.С. (МИСИС), д-р экон. наук, проф. Секерин В.Д. (ИПУ РАН), д-ра техн. наук, проф. Сидельников Ю.В. (МАИ), проф. Совлуков А.С. (ИПУ РАН), д-р экон. наук, проф. Сухарев О.С. (Ин-т экономики РАН), д-ра техн. наук, проф. Уткин В.А. (ИПУ РАН), проф. Хоботов Е.Н. (МВТУ), канд. физ.-мат. наук, доцент Чеботарев П.Ю. (ИПУ РАН), д-ра физ.-мат. наук, проф. Чхартишвили А.Г. (ИПУ РАН), проф. Щербаков П.С. (ИПУ РАН).

### **РЕГИОНАЛЬНЫЕ РЕДАКЦИОННЫЕ СОВЕТЫ**

**Волгоград** – д-ра физ.-мат. наук, проф. Воронин А.А., проф. Лосев А.Г. (ВолГУ); **Воронеж** – д-р техн. наук, проф. Баркалов С.А., д-р физ.-мат. наук, проф. Головинский П.А. (ВГАСУ), д-р техн. наук, проф. Подвальный С.Л. (ВГТУ); **Ижевск** – д-р физ.-мат. наук, проф. Непейвода Н.Н., к-т физ.-мат. наук, проф. Родионов В.И. (УдмГУ); **Иркутск** – д-ра физ.-мат. наук, проф. Бычков И.В., проф. Лакеев А.В. (ИДСТУ СО РАН); **Казань** – д-р физ.-мат. наук, проф. Маликов А.И., д-р физ.-мат. наук, проф. Сиразетдинов Р.Т. (КГТУ-КАИ); **Липецк** – д-ра техн. наук, проф. Кузнецов Л.А., проф. Погодаев А.К. (ЛГТУ); **Самара** – д-ра экон. наук, проф. Богатырев В.Д., проф. Гераськин М.И., д-р техн. наук, проф. Засканов В.Г. (СГАУ); **Санкт-Петербург** – д-ра физ.-мат. наук, проф. Петросян Л.А. (СПбГУ), проф. Фрадков А.Л. (ИПМ РАН); **Старый Оскол** – д-р техн. наук, проф. Еременко Ю.И. (СТИ); **Тверь** – д-ра техн. наук, проф. Кузнецов В.Н., проф. Палюх Б.В. (ТГТУ).

**Адрес редакции:** 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65.

**Адрес в Интернет:** [ubs.mtas.ru](http://ubs.mtas.ru).

Номер гос. регистрации электронного научного издания (ЭНИ): 0420900023.

© ИПУ РАН, 2009

## СОДЕРЖАНИЕ

### *Системный анализ*

---

*Семьдесят лет становления и развития отечественной науки управления: Институту проблем управления – 70 лет.....* 5

**Надеждин О. В., Заминова А. Р.**

*Анализ связности динамики нагнетательных и добывающих скважин.....* 35

### *Анализ и синтез систем управления*

---

**Андриевский Б. Р., Фрадков А. Л.**

*Адаптивная синхронизация нелинейных систем одного класса при ограниченной пропускной способности канала связи.....* 48

### *Управление в социально-экономических системах*

---

**Бурков В. Н., Цветков А. В., Сычев А. П.**

*Механизмы стимулирования сокращения сроков реализации проектов при линейных функциях затрат.....* 84

**Иващук О. А., Константинов И. С.**

*Обеспечение адаптивного управления экологической безопасностью промышленно-транспортного комплекса.....* 96

**Ильин В. Д.**

*Модель нормализованной экономики (НЭк-модель): основы концепции.....* 116

<b>Турганбаев Е. М., Козлова М. В.</b> <i>Идентификация региональных индустриальных кластеров и оценка их структурного воздействия на экономику региона (на примере ВКО) .....</i>	139
---	-----

***Управление техническими системами  
и технологическими процессами***

---

<b>Курдюков А. П., Гимин В. Н.</b> <i>Синтез робастного <math>H_{\infty}</math>-регулятора для управления энергетической котельной установкой.....</i>	179
---	-----

<b>Шнайдер Д.А.</b> <i>Упреждающее управление по критерию энергетической эффективности в теплоэнергетических системах металлургического производства .....</i>	215
---	-----

***Управление подвижными объектами и навигация***

---

<b>Андриенко А. Я., Тропова Е. И., Чадаев А. И.</b> <i>Проблемы управления при выведении на орбиту крупногабаритных грузов.....</i>	231
--	-----

***Технические и программные средства управления***

---

<b>Андреев А. К., Камаев Д. А., Трахтенгерц Э. А.</b> <i>Экспертное прогнозирование последствий повреждения систем жизнеобеспечения .....</i>	243
--	-----

<b>Шаповалов А. А.</b> <i>Использование беспроводных сетей стандарта IEEE 802.16 (WiMAX) для построения канала передачи информации в системах управления безопасностью мореплавания.....</i>	294
---	-----



УДК 001(091)  
ББК 72.3

## **СЕМЬДЕСЯТ ЛЕТ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКИ УПРАВЛЕНИЯ: ИНСТИТУТУ ПРОБЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ – 70 ЛЕТ**

*В обзорной статье, посвященной 70-летию юбилею Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), кратко излагается история ИПУ, перечисляются основные современные направления исследований, упоминаются знаменитые ученые, в различное время работавшие в ИПУ, и их вклад в теорию и практику управления.*

**Ключевые слова:** Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 70-летний юбилей, история российской теории управления.

В 1939 г. Совнарком СССР принимает решение об организации в составе Отделения технических наук АН СССР Института автоматики и телемеханики (на базе существовавшей с 1934 г. Комиссии по телемеханике и автоматике). Первым директором Института был назначен бывший военный лётчик, а к тому времени – выдающийся учёный в области авиационной энергетики, академик Виктор Сергеевич Кулебакин. Перед Институтом стояла задача развернуть фундаментальные исследования в области автоматики и управления, связав их с решением практических задач. С самого начала существования Института его деятельность связана с такими известными всему миру именами учёных, как В.С. Кулебакин, Н.Н. Лузин, А.А. Андронов, Б.Н. Петров, М.А. Айзерман, Я.З. Цыпкин, Б.С. Сотсков, М.А. Гаврилов, А.А. Фельдбаум и многие другие.

Ряд выдающихся учёных – теоретиков и прикладников науки об управлении – выросли или получили мировую известность в стенах Института. Наряду с этим, к работам Института всегда привлекались крупные учёные, которых интересовала новая

область знаний. Они привносили в Институт собственный опыт постановки научных проблем и поиска путей их решения, способствовали созданию в Институте особой творческой атмосферы, оказывая важнейшее влияние на формирование этических принципов общения в научном коллективе. Именно выдающиеся учёные с мировыми именами оказали огромную помощь в установлении профессиональных контактов Института с международным научным сообществом. Как результат, наша страна стала одним из инициаторов создания Международной федерации по автоматическому управлению – ИФАК и организатором I Всемирного конгресса ИФАК, который прошёл в Москве в 1960 году.

В момент создания Института в его составе было 22 сотрудника, и в том числе Б.Н. Петров (будущий академик и вице-президент АН СССР, руководивший Институтом позднее, в 1947–1951 гг.), М.А. Гаврилов (будущий член-корреспондент АН СССР), Н.Н. Шумиловский (будущий академик Киргизской академии наук), профессора В.А. Лоссиевский, Г.В. Щипанов и др. Вскоре в штат Института был принят выдающийся математик академик Н.Н. Лузин, который – как впоследствии и академик А.А. Андронов – стал воспитателем целой плеяды блестящих учёных-теоретиков в области управления.

Предвоенные годы жизни Института отмечены значительными продвижениями в области описания систем управления с помощью дифференциальных уравнений и дискуссией по «условиям компенсации» Г.В. Щипанова, при выполнении которых, как утверждал их автор, система автоматического регулирования перестаёт реагировать на приложенные к ней внешние возмущения. Эта дискуссия велась на страницах не только научных изданий, но и центральной партийной прессы. Фактически, условия Щипанова были предтечей того, что впоследствии стало теорией инвариантности, развитой В.С. Кулебакиным, Н.Н. Лузиным и Б.Н. Петровым. Г.В. Щипанов умер в 1953 г., а его научная «реабилитация» состоялась в 1960 г., когда комиссия в составе академиков А.А. Дородницына, А.Ю. Ишлинского

и Б.Н. Петрова подтвердила научную значимость его открытия (формально «условия компенсации Г.В. Щипанова» были признаны открытием в 1966 г. с приоритетом от апреля 1939 г.).

В годы войны Институт работает на интересы фронта, армии, а ряд его будущих научных корифеев (М.А. Айзерман, П.П. Пархоменко, Я.З. Цыпкин и др.) с оружием в руках защищает Родину. Среди важнейших результатов исследований ученых-иатовцев, направленных на повышение боеспособности Советской Армии во время Великой Отечественной войны, нельзя не отметить работы по борьбе с неконтактным минно-торпедным оружием, проводившихся под руководством будущего члена-корреспондента АН СССР Б.С. Сотскова, и работы по автоматизации контроля качества при производстве патронных гильз крупного калибра, которые велись тогда молодым инженером Б.Н. Петровым под руководством будущего академика В.А. Трапезникова, возглавлявшего Институт в 1951–1987 гг. Группа под руководством М.А. Гаврилова занималась на военном заводе наладкой релейной аппаратуры и разрабатывала способы борьбы с помехами в системах управления подвижными объектами.

После войны в Институт приходит академик А.А. Андронов и организует знаменитый Андроновский семинар, через который проходит почти всё послевоенное поколение научных лидеров Института автоматики и телемеханики (М.А. Айзерман, А.Я. Лернер, М.В. Мееров, В.В. Петров, В.В. Солодовников, Я.З. Цыпкин, А.А. Фельдбаум и многие другие). В 1969 г. Президиум Академии наук СССР учредил премию им. А.А. Андропова, одними из первых лауреатов которой стали А.Г. Бутковский и ученик Андропова М.В. Мееров.

Наиболее выдающимися достижениями Института в 40–50-е годы становятся:

- разработка математического аппарата алгебры логики для описания, анализа и синтеза релейно-контактных схем (М.А. Гаврилов);

- разработка общей теории линейных систем регулирования (В.С. Кулебакин, Б.Н. Петров, В.В. Солодовников, Я.З. Цыпкин, М.А. Айзерман, М.В. Мееров и др.);
- развитие теории нелинейных систем управления, в том числе метода точечных преобразований, теории абсолютной устойчивости и теории релейных систем (В.В. Петров, Г.М. Уланов, А.А. Фельдбаум, М.А. Айзерман, Я.З. Цыпкин);
- теория аналитического конструирования регуляторов (А.М. Лётов);
- разработка общих методов исследования дискретных систем автоматического регулирования (Я.З. Цыпкин);
- разработка основ теории оптимального управления (А.А. Фельдбаум, А.Я. Лернер и, впоследствии, А.Г. Бутковский, В.Ф. Кротов);
- разработка теории дуального управления (А.А. Фельдбаум);
- создание первой отечественной серии аналоговых вычислительных машин (Б.Я. Коган, В.А. Трапезников и др.);
- создание принципиально новых чувствительных элементов, датчиков и приборов (Б.С. Сотсков, Д.И. Агейкин, М.А. Розенблат, Е.К. Круг и др.).

В начале 50-х гг. по просьбе С.П. Королева и В.П. Глушко в Институте были начаты работы по управлению жидкостными ракетными двигателями для первой в мире межконтинентальной ракеты Р-7. Руководил работами Б.Н. Петров. Уже к 1953 г. были получены первые результаты по решению задачи управления расходом топлива, проектированию системы опорожнения баков, системы регулирования кажущейся скорости, рассмотрены возможные типы исполнительных механизмов в системах управления ракетой (Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, В.В. Петров, Г.М. Уланов, С.В. Емельянов, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова и др.). В дальнейшем эти результаты были развиты и предложены принципы построения и теория систем управления жидкостными ракетными двигателями

(Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Н. Чацкий, В.Н. Марков и др.).

В связи с разработкой систем регулирования опорожнения баков и синхронизации расходования топлива была создана теория бортовых терминальных систем управления (Б.Н. Петров, Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов и др.).

В 80-е гг. была завершена разработка общей концепции совершенствования энергетических характеристик ракет-носителей средствами управления (Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко, В.П. Иванов и др.).

Системы управления, созданные на основе выполненных Институтом работ, являются в настоящее время составной частью всех крупных жидкостных ракет разработки Главных конструкторов С.П. Королева, М.К. Янгеля, В.Н. Челомея, В.Ф. Уткина.

С середины 50-х гг. в Институте начала развиваться теория управления деформируемыми космическими аппаратами (спутники с большими панелями солнечных батарей, с выносными радиоантеннами и др.). Были предложены модально-физическая форма математической модели, амплитудный и фазовый принципы демпфирования упругих колебаний конструкций объекта, метод фазовой биплоскости для синтеза алгоритмов управления (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов).

В последние годы решена проблема совместного оценивания координат «жесткого» и упругого движений деформируемого космического аппарата (В.А. Суханов, Т.В. Ермилова, А.С. Ермилов и др.). Предложены алгоритмы управления, использующие элементы интеллектуальной диагностики состояния упругого объекта, алгоритмы адаптации с использованием нечеткой логики (В.Ю. Рутковский, В.М. Суханов, И.Н. Крутова, В.М. Глумов и др.).

В конце 50-х гг. были начаты работы по теории адаптивных систем с моделью (Б.Н. Петров, В.Ю. Рутковский, И.Н. Крутова, С.Д. Земляков, Б.В. Павлов, И.Б. Ядыкин и др.). Были предло-

жены принципы построения таких систем, линеаризованные модели систем, «ляпуновские» алгоритмы адаптации, введено понятие «обобщенного» объекта и синтез его структуры на основе теории инвариантности.

В дальнейшем полученные результаты были обобщены и на их основе разработаны теория адаптивного координатно-параметрического управления, теория настраиваемой работоспособности, концепция восстанавливаемой функциональной работоспособности и настраиваемой стратегии управления, развивается теория оптимальных адаптивных регуляторов. На основе теории адаптивного координатно-параметрического управления впервые в СССР были разработаны адаптивные системы управления рядом важнейших типов летательных аппаратов.

В 1980 г. Академия наук СССР учредила Золотую медаль им. Б.Н. Петрова (с 1993 г. – премия им. Б.Н. Петрова). Первую золотую медаль им. Б.Н. Петрова в 1983 г. получил В.Ю. Рутковский. В 2004 г. премии им. Б.Н. Петрова удостоены Ю.П. Портнов-Соколов, А.Я. Андриенко и В.П. Иванов, в 2007 г. – В.В. Кульба, Б.В. Павлов и чл.-корр. РАН Е.А. Микрин (РКК «Энергия»).

Будущий академик Я.З. Цыпкин развил общую теорию адаптивных систем, которая стала естественным продолжением теории дуального управления А.А. Фельдбаума и впоследствии дала начало теории робастных систем, основы которой были заложены Я.З. Цыпкиным и развиваемой сегодня в лаборатории им. Я.З. Цыпкина под руководством Б.Т. Поляка. Дело в том, что в классической теории обычно предполагается, что модель системы известна или оценивается в процессе идентификации. Между тем, в реальных задачах все характеристики объекта содержат неизбежные неточности. Робастная теория, вызывающая огромный интерес исследователей во всём мире, предлагает методы учёта подобных неопределённостей. Если в первые годы работы в центре внимания находились проблемы анализа (робастная устойчивость), то теперь изучаются и важные про-

блемы синтеза (робастное управление). Для решения трудных задач робастного управления оказались полезными понятие сверхустойчивости (достаточное условие устойчивости, формулируемое в терминах линейных условий на элементы системной матрицы), вероятностный подход, численные методы. Очень удобным аппаратом, приспособленным к решению современных задач анализа и синтеза робастных систем, явилась классическая теория  $D$ -разбиения, развитая на новом уровне в работах сотрудников лаборатории.

Академиком В.С. Пугачёвым и его учениками была создана общая теория управления стохастическими системами. Это связано с тем, что по мере развития теории автоматического управления был постепенно осознан тот факт, что классические методы этой теории недостаточны для расчета сложных автоматических систем, работающих в условиях случайных воздействий. Естественным шагом в развитии теории систем и процессов управления стало привлечение вероятностных методов, позволяющих учитывать влияние различного рода случайных возмущений и помех на работу автоматических систем и их элементов. В результате в рамках общей теории процессов управления оформилось важное направление – стохастическая теория процессов управления, широко использующая методы теории вероятностей и математической статистики. Работы Института в области стохастических проблем управления дали мощный толчок ее интенсивному развитию, существенно обогатили ее и привели к появлению и развитию новых разделов.

Важным направлением исследований в Институте стала теория статистически оптимальных систем, в рамках которой были разработаны методы синтеза оптимальных нестационарных и нелинейных систем (В.С. Пугачёв, Л.П. Сысоев), новые эффективные методы нелинейной фильтрации и экстраполяции случайных процессов (Р.Ш. Липцер, А.Н. Ширяев, В.С. Пугачёв), методы статистической оптимизации по различным критериям качества (Н.И. Андреев). В Институте были разработаны эффективные приближенные методы расчета и анализа точно-

сти многомерных нелинейных систем, подвергающихся случайным воздействиям (М.Л. Дашевский, Р.Ш. Липцер). Была создана статистическая теория обучения и самообучения автоматических систем, функционирующих в условиях неполной информации (В.С. Пугачёв), заложены основы общей теории стохастических систем (В.С. Пугачёв, И.Н. Сеницын). Для последнего периода развития стохастической теории управления характерен большой интерес к синтезу автоматических систем в условиях параметрической и непараметрической неопределенности. Были разработаны основы теории устойчивого непараметрического оценивания функционалов от неизвестных распределений и на ее основе создана теория непараметрического оценивания случайных процессов с неизвестными вероятностными характеристиками (А.В. Добровидов, Г.М. Кошкин, В.А. Васильев).

Н.С. Райбман, один из учеников В.С. Пугачёва, приложил немалые усилия, чтобы методы построения математических моделей объектов управления по экспериментальным статистическим данным и теория идентификации стали эффективными инструментами разработчиков систем управления различными народно-хозяйственными объектами (С.А. Власов, В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель, В.М. Чадеев).

Работы по стохастическому робастному управлению для линейных дискретных стационарных систем были начаты в Институте в 1992 г. как развитие идей  $H_\infty$ -теории управления, активно обсуждавшихся в период 1991–1992 гг. на семинаре под руководством А.С. Позняка. В соавторстве с И.Г. Владимировым (ИППИ РАН) и А.В. Семеновым (ГосНИИАС) А.П. Курдюковым была создана теория построения стохастических систем управления, робастных относительно характеристик случайного входного возмущения.

Построенная теория была названа авторами анизотропийной теорией управления (анизотропия – термин, характеризующий неоднородность свойств по направлениям), так как в основе этой теории лежит понятие анизотропии сигнала.



Анизотропией сигнала является характеристика отклонения вероятностного распределения многомерного входного сигнала от многомерного сигнала, распределенного по нормальному закону с нулевым средним и скалярной ковариационной матрицей, в некотором смысле являющегося изотропным. Анизотропийная теория управления занимает промежуточное место между теорией построения линейно-квадратичных гауссовских регуляторов и  $H_\infty$ -теорией управления. Более того, обе эти теории являются частными случаями анизотропийной теории и получаются при стремлении анизотропии, соответственно, к нулю и к бесконечности.

Анизотропийная теория сочетает преимущества упомянутых выше теорий, позволяет строить регуляторы, менее консервативные, чем  $H_\infty$ -регуляторы, и более робастные, чем квадратично-гауссовские регуляторы. Построенная теория показала свою состоятельность в приложении к построению регуляторов для посадки самолета в условиях неконтролируемых возмущений.

В 1957 г. будущий академик С.В. Емельянов впервые в мировой практике предложил использовать неустойчивые движения и неустойчивые структуры для улучшения качества переходных процессов в системах автоматического управления. В 60-х гг. С.В. Емельяновым и его школой эта идея была развита, в результате чего была создана теория систем с переменной структурой. В классе систем с переменной структурой эффективно решались актуальные задачи теории управления, в том числе: стабилизация существенно неопределенных систем; построение системы слежения, обладающей высоким порядком астатизма; фильтрация и дифференцирование при неизвестной интенсивности шума и др.

С начала 60-х гг. по инициативе А.А. Фельдбаума и М.А. Айзермана в Институте начались интенсивные исследования по теории распознавания образов, автоматической классификации, самообучающимся системам, методам обработки сложноорганизованных данных. Здесь необходимо отметить

фундаментальные работы, проводившиеся в ряде лабораторий: Я.З. Цыпкин и Г.К. Кельманс; М.А. Айзерман, Э.М. Браверман, Л.И. Розоноэр и Б.М. Литваков; В.Н. Вапник и А.Я. Червоненкис; А.А. Дорофеюк, И.Б. Мучник и Е.В. Бауман.

Институт является пионером и основоположником признанного во всем мире широкого научного направления – «Оптимальное управление системами с распределенными параметрами (СРП)» (А.Г. Бутковский). Только перечисление важных научных, технических и технологических приложений этой дисциплины, в которых участвовал Институт, займет довольно много места: это металлургия, химия, машиностроение, космические объекты, экономика и др.

В теоретическом отношении проблемы оптимального управления СРП связаны с дифференциальными уравнениями с частными производными и с запаздыванием, интегральными и интегро-дифференциальными уравнениями, функциональными уравнениями и рядом других математических дисциплин, например таких, как теория чисел, фракталы и другие. С физической точки зрения эти проблемы связаны с управлением полями и сплошными средами различной, в том числе неклассической, природы.

Сейчас в мире насчитывается много тысяч публикаций, посвященных этому научному и прикладному направлению. В Институте на эту тему написано более десяти монографий. Восемь из них переизданы в США, Великобритании, Нидерландах, Финляндии. Нужно отметить монографию «Управление квантово-механическими системами», написанную в Институте в 1984 г. на основе статей от 1979 г., которая переиздана на Западе и признана в мире как пионерская в этой области. Эта проблема представляется сейчас как ключевая в области современной нанотехнологии.

Математическая специфика направления исследований Института под руководством В.Ф. Кротова сводится к формулировке условий глобальной оптимальности управления динамическими системами и созданию основанного на них аппарата

решения соответствующих задач. Всё начиналось с создания и изучения этого аппарата для детерминированных динамических систем, описываемых обыкновенными дифференциальными уравнениями. Затем полученные первоначально результаты были обобщены, с одной стороны, «вглубь» – в направлении их смыкания с необходимыми условиями минимума функционалов вариационного исчисления и теории оптимального управления – вплоть до получения единых необходимых и достаточных условий, а с другой – «вширь» и распространены на новые классы задач с распределёнными параметрами, с неполной информацией и т. д.

Уравнения теории оптимального управления крайне сложны, и их решение сопряжено со многими вычислительными проблемами, составляющими предмет прикладной части теории оптимального управления – вычислительных методов синтеза допустимого и оптимального управлений. Были разработаны новые эффективные универсальные методы последовательного улучшения управления, опирающиеся на указанные идеи и подкреплённые вычислительным опытом и соответствующими программными средствами.

Это направление математической теории оптимального управления разрабатывается в сотрудничестве с рядом научных коллективов РАН и университетов России, стран СНГ и дальнего зарубежья (Германия, США, Израиль и др.). В комплексе выполняемых исследований в рамках этого интересующего весь мир научного направления Институт играет ведущую роль. Интерес к этим работам отражён в многочисленных монографиях, учебниках, обзорах и статьях, в которых развиваются и излагаются соответствующие результаты. Подробный анализ результатов исследований по данному направлению и его приложениям содержится в монографии В.Ф. Кротова «Global Methods in Optimal Control Theory», Marcel Dekker Inc., 1996, New-York, Basel.

Полученные математические результаты применялись для исследования следующих прикладных научно-технических проблем:

- (1) оптимизация траекторий движущихся объектов, анализ и синтез их систем управления;
- (2) моделирование и анализ развития многоотраслевой экономики;
- (3) синтез и оптимизация управления квантовым состоянием вещества.

Из проблем класса (1) выделим задачи оптимального управления манёврами летательного аппарата в атмосфере Земли при помощи программного изменения тяги двигателя и угла атаки. Расчёты этих манёвров постоянно воспроизводятся в инженерной практике применительно к различным классам летательных аппаратов – от космических аппаратов до самолётов. Имеется большое число публикаций по решению этих задач при помощи уравнений принципа максимума и других способов локальной оптимизации. Предлагаемые подходы отличаются от других известных в литературе тем, что решают проблему отыскания абсолютного оптимума, а также продвинутой аналитической частью решения, алгоритмической простотой и, в частности, отсутствием краевых задач.

В рамках прикладного направления (2) проведены исследования нелинейных оптимизационных моделей развития многоотраслевой экономики.

Особый интерес представляет прикладное направление (3). В настоящее время существует обширная и бурно развивающаяся область новых физических технологий, базирующихся на управлении квантовым состоянием вещества путём воздействия на него электромагнитного поля. Среди них – синтез новых материалов при помощи физических средств (вместо химических), разделение изотопов, фотохимия и др. Математический алгоритм синтеза подобного управления является важнейшей частью проектирования этих нанотехнологий.

По общему мнению физиков, адекватным аппаратом для осуществления подобного синтеза являются методы теории оптимального управления. Соответствующие задачи описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений, имеющими порядки в несколько тысяч. Были проведены исследования решений таких задач при помощи разработанных под руководством В.Ф. Кротова методов последовательного улучшения. Публикация этих методов породила в 90-е гг. волну исследований специалистов-физиков и соответствующих публикаций в ведущих мировых физических и физико-химических журналах. Во всех этих публикациях делался вывод о том, что методы, разработанные в Институте, являются наилучшим способом решения соответствующих задач. Последняя такая статья опубликована в 2008 г. в журнале *Physical Review*.

В конце 60-х гг. под руководством М.В. Меерова в Институте были начаты фундаментальные исследования, связанные с проблемами построения оптимальных многосвязных систем управления (будущий академик О.И. Ларичев, В.Н. Кулибанов, Я.М. Берщанский, Р.Т. Янушевский), в частности, с использованием условий А.А. Милютина и А.Я. Дубовицкого, принципов оптимальности Р. Беллмана и принципа максимума Л.С. Понтрягина. Полученные результаты послужили основой для разработки методов и алгоритмов построения систем оптимального динамического управления гидродинамическими процессами фильтрации при разработке нефтяных месторождений.

В 2000-е гг. были начаты фундаментальные исследования проблем моделирования и управления нелинейными динамическими многосвязными системами большой размерности (А.В. Ахметзянов, В.Н. Кулибанов). Были получены результаты, подтверждающие необходимость разработки новых принципов моделирования и оптимального управления процессами, учитывающих структурные и физические особенности пространства состояний, свойства движущихся субстанций, характер допустимых управляющих воздействий.

Огромную роль в формировании у коллектива сотрудников Института вкуса к решению сложных и комплексных проблем управления важнейшими народно-хозяйственными объектами сыграли работы по «Проекту 705» – созданию первой в мире комплексно автоматизированной атомной подводной лодки (АПЛ). Все работы по новой АПЛ возглавил академик А.П. Александров, по автоматизации – академик В.А. Трапезников. Впоследствии эти работы нашли продолжение при создании и совершенствовании систем управления атомными ледоколами («Арктика», «Сибирь»), а также новой серии крупнотоннажных танкеров и контейнеровозов и на порядок изменили представления моряков о требованиях к надёжности комплектующих элементов. В процессе реализации «Проекта 705» было понято, что важнейшую роль в повышении эффективности решения боевых задач, особенно в экстремальных ситуациях, играет человеческий фактор (в то время до 70% аварийных ситуаций возникали по вине человека-оператора). Была создана специальная группа во главе с Д.И. Агейкиным, разработки которой, в том числе, полунатурных стендов-тренажёров, методик профессионального отбора операторов, выбора технических средств визуализации и характера представления информации, позволили на порядок поднять эффективность и надёжность работы человека-оператора и групп операторов (боевых расчётов) при одновременном резком (втрое) сокращении численности личного состава АПЛ. И ещё многие другие идеи, программы и целые направления были разработаны впервые, а некоторые из них не потеряли актуальности и активно используются до сих пор.

Другой пример комплексной работы такого рода – проект «Запчасть», направленный на решение проблемы обеспечения народного хозяйства СССР запасными частями к разнообразной технике и оборудованию, в том числе двойного назначения. Работа выполнялась группой сотрудников Института под руководством А.А. Дорофеюка в 1971–1975 гг. Огромную роль в её успешном выполнении сыграл В.А. Трапезников, который как

первый заместитель Председателя ГКНТ сумел привлечь внимание к этой работе А.Н. Косыгина, Д.С. Полянского (в то время первый зам. Председателя Совета министров СССР), первых руководителей нескольких Союзных республик и крупных регионов РСФСР.

В 60-е гг. начались и продолжают и поныне работы в области создания автоматизированных информационно-управляющих систем (А.Ф. Волков, А.Г. Мамиконов, В.В. Кульба, А.Д. Цвиркун, О.И. Авен, В.Л. Эпштейн и др.). Первыми примерами таких систем стали АСУ «Металл» (автоматизированная система управления поставками металлопродукции в стране), АСУ «Морфлот», АСУ «Обмен» и др.

Огромную роль в автоматизации процессов массового обслуживания сыграла разработанная для Аэрофлота в конце 60-х – начале 70-х гг. АСУ «Сирена» бронирования мест и продажи билетов (Генеральным конструктором «Сирены» решением Совета Министров СССР был назначен В.А. Жожикашвили). Немалую роль во внедрении разрабатывавшихся методов автоматизации сыграл В.А. Кучерук.

В середине 80-х гг. было положено начало работам по исследованию вопросов управления безопасностью сложных систем (В.В. Кульба, А.Я. Андриенко, В.Н. Бурков, Б.Г. Волик, В.Г. Лебедев, Ю.С. Легович и др.). Работы эти продолжают и поныне. Из полученных результатов наиболее серьезные связаны с решением проблем информационной безопасности и управлением безопасностью в условиях чрезвычайных ситуаций.

Хорошо известны фундаментальные достижения Института и в области теории надёжности (Б.С. Сотсков, Б.Г. Волик, С.М. Доманицкий, И.Е. Декабрун, Б.П. Петрухин) и технической диагностики (П.П. Пархоменко, Е.С. Согомонян, М.Ф. Каравай и др.).

Широким фронтом велись и продолжают сегодня разработки новых технических средств и систем автоматизации, активным участником которых был академик Академии наук

Грузии И.В. Прангишвили, возглавлявший Институт в 1987–2006 гг. В начале 60-х гг. в микроэлектронике была выдвинута концепция однородных микроэлектронных логических и вычислительных структур. Концепция создавалась под руководством И.В. Прангишвили. На базе этой концепции в Институте были разработаны многопроцессорные вычислительные системы серии ПС (ПС–2000 и ПС–3000). По производительности комплексы ПС были соизмеримы с самыми мощными отечественными вычислительными системами соответствующих классов. Эти комплексы обладали наилучшими значениями соотношения производительность/стоимость.

Выдвинутая ещё в 50-е гг. Б.С. Сотсковым идея унификации средств автоматизации технологических процессов с помощью блочно-модульного принципа их построения легла в основу агрегатной унифицированной системы приборов. В последующие годы развитием этой идеи стали Государственные системы промышленных приборов и средств автоматизации ГСП–1 (60–70-е гг.) и ГСП–2 (80–90-е гг.).

Огромные продвижения были достигнуты в части создания новых принципов построения датчиков и измерительных приборов (Д.И. Агейкин, В.Ю. Кнеллер и др.), магнитных и полупроводниковых элементов (М.А. Розенблат, Н.П. Васильева и др.), средств автоматического анализа (система БАРС) и релейных устройств (М.А. Гаврилов, П.П. Пархоменко и др.), элементов пневмоавтоматики (М.А. Айзерман, А.А. Таль, А.А. Тагаевская, Т.К. Берендс и Т.К. Ефремова). Сегодня многие из этих работ находят свои продолжения в форме создания: современных магнитных элементов с применением нанотехнологий (С.И. Касаткин), средств струйной техники (А.М. Касимов), радиоволновых датчиков (Б.В. Лункин).

Под руководством А.М. Касимова разработана агрегатно-интегральная струйная техника (АИСТ), предназначенная для управления параметрами авиационных двигателей на воздухе от воздушной турбины с температурой до 5000°C (в отдельных случаях до 9500°C) при вибрациях, ударах и широком спектре



источников радиации. На основе разработок Института ОАО «Омское МКБ» и Московское ОАО «ЭГА» выпускают струйные регуляторы направляющего аппарата, компрессора и др. (более 20 регуляторов), которые эксплуатируются на самолетах Як-42, ИЛ-86, ИЛ-96, «Руслан», АН-70, Ту-204 и др. За последние 20 лет струйные регуляторы наработали в полете без отказов более 20 млн. ч.

В лаборатории волновых методов и средств получения информации под руководством Б.В. Лункина разрабатываются теория построения радиоволновых датчиков и ее приложения для решения задач измерения параметров и распознавания состояния объектов контроля и управления. Датчик включает в себя электродинамическую систему, являющуюся чувствительным элементом, и электронные средства формирования и преобразования первичной информации. Структура чувствительного элемента определяется контролируемым объектом, измеряемой величиной, условиями окружающей среды. Разработаны принципы построения датчиков различных параметров, созданы основы теории инвариантных измерений и теории построения датчиков запасов топлив в условиях невесомости, которые, в частности, нашли при непосредственном участии лаборатории применение в серийном освоении ряда информационно-измерительных систем для ракетно-космических комплексов.

В 70-е гг. были созданы новые поколения средств аналогоцифровой техники – гибридные вычислительные системы ГВС-100 и ГВС «Русалка» (Б.Я. Коган).

Ещё одним достижением Института стала система средств программируемой автоматики с параллельной структурой (СПА-ПС), разработанная в связи с делегированием в 1986 г. Институту научного руководства программой работ по созданию АСУТП для АЭС будущего. Авторами концепции СПА-ПС стали ученики М.А. Гаврилова (А.А. Амбарцумян и др.). Еще один проект, осуществлённый учениками М.А. Гаврилова (О.П. Кузнецов, А.К. Григорян и др.) и основанный на разрабо-

танной ими концепции языков программирования логических устройств, завершился созданием системы автоматизации программирования станков с ЧПУ, серийно выпускавшейся промышленностью в 80-е гг.

Работы Института по исследованию свойств полупроводниковых структур со специфическими вольтамперными характеристиками (В.Д. Зотов) привели к созданию принципиально новых полупроводниковых многофункциональных сенсоров (Z-сенсоров).

Начиная с 70-х гг. важным направлением стало исследование роли и участия человека в контуре управления и в работе по анализу и совершенствованию административных и социально-экономических систем. Здесь следует отметить пионерские работы Д.И. Агейкина и нынешние А.Д. Цвиркуна и В.К. Акинфиева, Ф.Ф. Пашенко, В.Б. Гусева, В.В. Павельева, А.С. Манделя, Э.А. Трахтенгерца и В.Г. Лебедева, А.А. Дорофеюка и А.Л. Чернявского, В.Н. Буркова, Д.А. Новикова и А.Г. Чхартишвили.

Сюда же примыкают работы по теории выбора (М.А. Айзерман, А.В. Малишевский и Ф.Т. Алескеров) и методам поддержки принятия управленческих решений (А.С. Мандель; А.А. Дорофеюк и А.Л. Чернявский; В.Н. Бурков, А.В. Щепкин и А.Ю. Заложнев).

Существенные результаты получены в области управления в задачах биологии, медицины и здравоохранения. С 60-х гг. этими проблемами начали заниматься в лабораториях М.А. Айзермана, Н.В. Позина, А.М. Петровского и А.А. Фельдбаума. Затем фронт работ расширился. В настоящее время задачами, связанными с исследованием различных аспектов управления в биомедицинских системах, активно занимается ряд лабораторий Института. Интересные результаты в разные годы получены А.А. Десовой; группой сотрудников лаб. №25 под руководством Е.А. Андреевой и О.Е. Хуторской; В.Н. Новосельцевым, А.И. Яшиным и А.И. Михальским, А.А. Дорофеюком, И.Б. Мучником и С.М. Бородкиным.

С середины 90-х гг. под руководством В.А. Уткина ведутся исследования по декомпозиционному синтезу систем управления в рамках блочного подхода. Данный подход, опирающийся на структурные свойства оператора объекта управления, является конструктивной методологической основой для анализа и синтеза систем управления линейными и нелинейными многомерными многоканальными объектами автоматического управления, функционирующими в условиях действия внешних неконтролируемых возмущений, параметрической неопределенности и при неполных измерениях. К настоящему времени разработаны декомпозиционные алгоритмы синтеза обратной связи для решения ряда фундаментальных задач теории управления (стабилизации, инвариантности, наблюдения, идентификации в реальном времени, слежения и их комплексе), которые позволяют разделить задачи синтеза большой размерности на независимо решаемые элементарные подзадачи меньшей размерности. Дополнительное применение методов теории систем с разрывными управлениями, функционирующими в скользящем режиме, как в задачах управления, так и в задачах наблюдения, позволяет обеспечить робастные свойства и инвариантность замкнутых систем. Предлагаемые алгоритмы, достаточно простые в реализации, позволяют снизить объем априорной информации об объекте управления и среде его функционирования. Разработанные в теории методы и алгоритмы для общего вида математических моделей динамических систем применяются для решения ряда прикладных задач, в которых объектами управления являются роботы-манипуляторы, двигатели внутреннего сгорания, электроприводы различных типов и другие технические процессы.

В конце 2006 г., после кончины Ивери Варламовича Грангишвили, директором Института избран академик Станислав Николаевич Васильев. Институт развивается, активизировав фундаментальные исследования в различных областях теории управления и её приложений, в том числе по его основным

направлениям научной деятельности, утверждённым Президиумом Российской академии наук 18 марта 2008 г.:

- теория систем и общая теория управления;
- методы управления сложными техническими и человеко-машинными системами;
- теория управления в междисциплинарных моделях организационных, социальных, экономических, медико-биологических и экологических систем;
- научные основы технологий управления подвижными объектами и навигации;
- теория и методы разработки программно-аппаратных и технических средств управления и сложных информационно-управляющих систем;
- научные основы интегрированных систем управления и автоматизации технологических процессов управления производством.

Под руководством Б.Т. Поляка продолжает развиваться теория линейных систем автоматического управления. Здесь в центре внимания находятся такие трудные и актуальные задачи, как синтез регуляторов заданной структуры (в частности, регуляторов низкого порядка), синтез статических регуляторов по выходу, проблема одновременной стабилизации, задачи управления при постоянно действующих возмущениях. Удалось разработать несколько эффективных подходов к их решению. Во-первых, на основе понятия сверхустойчивости можно получать решения упомянутых трудных задач с помощью линейного программирования. Во-вторых, предложен вероятностный подход к решению данных детерминированных задач. Рандомизированные алгоритмы оказались очень эффективными для многих задач управления и оптимизации.

Под руководством В.Ф. Кротова проводятся исследования по теории оптимальных систем управления и, в частности, развиваются методы вариационного исчисления и теории оптимального управления, разрабатываются алгоритмы синтеза и оптимизации управления с применением к объектам самой

различной природы – техническим, физическим, экономическим.

Из актуальных теоретических и прикладных направлений, интенсивно разрабатываемых сейчас в Институте, следует отметить также единую геометрическую теорию управления, теорию неклассических фрактальных управлений, существенно расширяющую класс конкретных приложений, теорию подвижного управления, породившую широкий класс приложений и вместе с этим целый класс новых трудных математических и вычислительных задач, например, нелинейную проблему моментов (А.Г. Бутковский).

В настоящее время в Институте проводятся фундаментальные исследования, связанные с разработкой принципов иерархической многоуровневой декомпозиции и расщепления нелинейных операторов в функциональных пространствах с распараллеливанием вычислений на многопроцессорных вычислительных системах в различных программных средах (А.В. Ахметзянов). Результаты исследований ориентированы на создание универсальных принципов моделирования и оптимального управления нелинейными многосвязными системами большой размерности, в частности, процессами фильтрации флюидов (жидких и газообразных углеводородов) в пористых средах резервуаров месторождений углеводородов с геологическими и геометрическими условиями залегания любой сложности. При этом вытесняющие реагенты выступают в роли управляющих воздействий.

Анизотропная теория распространена на системы с параметрическими возмущениями (А.П. Курдюков). Процедура синтеза анизотропных регуляторов требует решения системы уравнений Риккати, уравнения Ляпунова и алгебраического уравнения специального вида, для чего была разработана процедура решения такого рода уравнений методом гомотопий и создан пакет прикладных программ. В настоящее время ведутся работы по построению теории субоптимального анизотропного управления, анизотропной теории управления для алгеб-

ро-разностных систем, проводятся исследования по построению анизотропных регуляторов пониженного порядка.

Ведутся фундаментальные исследования решения *NP*-трудных проблем дискретной и комбинаторной оптимизации (А.А. Лазарев). Полученные результаты применяются для решения практических задач теории расписаний и календарного планирования. Для минимаксных задач теории расписаний впервые введена метрика, и для решения этих задач применяются методы изменения параметров, динамического программирования и другие современные методы исследования. В настоящее время ведутся работы по изучению природы сложности классических комбинаторных проблем и разрабатываются алгоритмы решения практических задач большой размерности за приемлемое время с гарантированной погрешностью целевой функции. Установлены тесные научные связи с ведущими научными школами из Германии, Франции, Великобритании.

Проводятся исследования по изучению математических моделей инфраструктурных систем управления. Предложены новые принципы построения систем автоматического регулирования частоты и мощности для крупных энергообъединений, базирующиеся на применении новых высокоточных устройств измерения с привязкой к астрономическому времени и новых методов синтеза регуляторов на основе решения оптимизационных задач с ограничениями (И.Б. Ядыкин).

Под руководством члена-корреспондента РАН Д.А. Новикова активно развиваются теоретические основы разработки и исследования теоретико-игровых и оптимизационных моделей управления системами междисциплинарной природы (организационно-технической, социально-экономической, эколого-экономической и др.). Предложены оригинальные методы анализа, синтеза и оптимизации управления иерархическими, многокомпонентными, динамическими и распределёнными организационными системами, в том числе функционирующими в условиях неопределённости, кооперативного или конкурентного взаимодействия элементов, с учётом коммуникативной

поддержки и информационного противодействия (Д.А. Новиков, В.Н. Бурков, М.В. Губко, Н.А. Коргин, С.П. Мишин, А.Г. Чхартишвили). На их основе разработаны комплексы прикладных механизмов управления, эффективность которых подтверждена при разработке и практическом внедрении механизмов управления проектами федерального, регионального и корпоративного уровней (В.А. Ириков, А.В. Щепкин).

Под руководством Л.Б. Рапопорта исследуются неголономные и другие механические системы. Решена известная задача управления неголономной системой с качением – стабилизация движения колесной системы (КС) вдоль заданной траектории. Построен закон управления, стабилизирующий движение КС вдоль плоской гладкой кривой. По основным переменным обеспечивается устойчивость в большом. Обоснована устойчивость КС при учете погрешностей измерения переменных состояния. Разработаны методы оценки области устойчивости КС в условиях ограничений на управление. Построены численные методы построения оценок областей устойчивости и достижимости. Построены законы управления с учетом фазовых ограничений, наложенных на состояния КС. Например, синтезированы управления в классе кусочно-линейных функций с насыщением для учета ограниченности угла поворота ведущих колес. Разрабатываются грубые законы управления прикладного характера – для КС типа автономных мобильных роботов.

По направлению устойчивости, резонансов и управления движением механических систем, в частности, исследуются: достаточные условия рождения изолированного колебания и его устойчивости в обыкновенной точке семейства в системе общего вида; сценарии рождения колебаний для критической точки семейства; конструктивные условия рождения и устойчивости колебаний как в нерезонансном, так и в резонансном случаях в системе общего вида; условия стабилизации колебания системы, состоящей из слабосвязанных подсистем (В.Н. Тхай).

Под руководством С.К. Даниловой ведутся работы по разработке метода определения экстремальных свойств оптимального управления морскими подвижными объектами (МПО) для построения эффективных алгоритмов реализации принципа максимума. Разрабатывается методика синтеза субоптимального управления движением МПО с использованием оценок экстремальных свойств оптимального управления объектом и заданных оценок текущих и прогнозируемых ситуаций по состоянию технических средств и систем управления объекта, воздействию внешней среды и гипотез о возможных вариантах развития ситуаций в нештатных и аварийных режимах. Разрабатываются алгоритмы синтеза альтернативных безопасных траекторий движения МПО с применением методов субоптимального управления и динамических оценок текущих и прогнозируемых ситуаций, построенных с помощью динамических экспертных систем продукционного типа.

Осуществляются разработка и исследование методов построения и особенностей функционирования сложных программно-технических комплексов для АСУТП. Проводятся теоретические исследования методов построения баз знаний для создания нового поколения систем управления на базе аппарата нечетких множеств, моделирование объектов управления в качественных шкалах и автоматическая генерация баз знаний на основе накопленных опытных данных. Разрабатываются программные системы, позволяющие создавать «под ключ» системы автоматического управления с встроенными базами знаний для задач ранней диагностики и др. Практическая значимость результатов состоит в возможности применения данной методологии для создания макета сложной программно-технической системы управления объектами повышенной опасности, отвечающей современным требованиям открытых систем (АСУТП АЭС в РФ, Иране, Индии – Н.Э. Менгазетдинов, А.Г. Полетыкин).

Под руководством М.Х. Дорри ведётся разработка теоретических основ создания исследовательских комплексов и стендов



для анализа, синтеза и отладки алгоритмического и программного обеспечения интеллектуальных систем управления сложными техническими комплексами с использованием интегрированных систем обработки данных на основе:

- блочно-иерархического структурирования задачи;
- объединения расчета непрерывных и логических процессов;
- образного представления объектов;
- организации многоуровневого взаимодействия блоков между собой и с системой;
- взаимодействия инструментальной системы с базами данных и модулями, имитирующими исследуемые объекты и помогающими легко реконструировать решаемые задачи.

Ведутся инициативные работы по новому направлению нанодатчиков, не имеющего аналогов в мире: по туннельным датчикам на основе магнитных квантовых точек (совместно с ФИ РАН и ТЦ МИЭТ), магниторезистивные (МР) свойства которых обнаружены сотрудниками ФИАН. Ведутся работы в целях получения и исследования наноэлементов на основе магнитополупроводниковых МР наноструктур. Разрабатываемые нанодатчики составят конкуренцию существующим анизотропным и спин-вентильным МР датчикам магнитного поля и тока (С.И. Касаткин).

Разработаны концепция новой Интернет-службы и принципы построения специализированных средств и технологий для поддержки удаленных взаимодействий в гетерогенной информационной и сетевой среде, ориентированных на решение следующих системных задач (В.Н. Лебедев):

- создание простого, интуитивно понятного средства сетевой поддержки распределенных приложений и многоагентных систем;
- обеспечение защиты от потери данных в условиях некачественных каналов связи (надежность и устойчивость к сетевым сбоям);

- создание средств межсерверной маршрутизации данных, одинаково применимых как для on-line, так и для off-line взаимодействий.

В последние годы разработаны многоканальные радиочастотные датчики запасов топлива в баках переменной конфигурации; положения границ раздела и инвариантных измерений уровня; толщины покрытий и насыпных материалов; объемного содержания в многокомпонентных эмульсионных и слоистых потоках (Б.В. Лункин). Важной составляющей в этих датчиках являются алгоритмы: от простых (линейная комбинация двух частот) – для температурной компенсации, до сложных (системы уравнений) – для определения положения размытых границ раздела слоистых сред. Ведутся новые разработки для создания комбинированных датчиков на основе возбуждения в них электромагнитных и акустических колебаний в режиме резонанса. Они особенно важны для решения задач измерений параметров многокомпонентных нестационарных потоков.

Разработано математическое и алгоритмическое обеспечение подсистем АСУ оперативной диспетчерской службы Департамента жилищно-коммунального хозяйства и благоустройства Москвы с формализацией технологических процессов уборки снега в крупных городах, начиная от задач планирования объемов работ по поступающему метеопрогнозу и заканчивая задачами оперативного управления вывозом снега (Г.Г. Гребенюк). Разработана и сдана в эксплуатацию первая очередь информационной системы обеспечения градостроительной деятельности для муниципальных образований. Система предназначена для Комитета архитектуры и градостроительства Сургутского района Ханты–Мансийского автономного округа и является одной из первых в РФ. Подготовлены предложения по комплексной инновационной программе развития Московского мегаполиса «Комплекс приоритетных инновационных проектов повышения эффективности управления и жизнеобеспечения мегаполиса». Данная программа ориентирована на разработку прорывных инновационных проектов, охватывает с системных и управлен-

ческих позиций основы жизнедеятельности г. Москвы с учётом современных тенденций глобализации и мирового развития для социальной защищенности населения и обеспечения более высокого уровня устойчивого развития города.

Сформированы совместные научные проекты с Национальной академией наук Украины (соруководитель от НАНУ – академик НАНУ В.М. Кунцевич) и Национальной академией наук Беларуси (соруководитель от НАНБ – член-корреспондент НАНБ Ф.М. Кириллова). В сотрудничестве с Институтом динамики систем и теории управления СО РАН, ранее возглавлявшимся С.Н. Васильевым, а ныне – чл.-корр. РАН И.В. Бычковым, развивается ведущая научная школа по устойчивости и управлению в гетерогенных и некоторых других моделях динамических и интеллектуальных систем. Тридцать пять научных докладов сотрудников Института было включено в программу 17-го Конгресса ИФАК (июль 2008 г., Сеул, Корея). Обновлено и расширены составы Научного совета РАН по теории управляемых процессов и автоматизации и редколлегии журнала «Автоматика и телемеханика» – первого в мире журнала по автоматическому управлению, созданного ещё в 1936 г. (главный редактор – С.Н. Васильев).

С 2009 г. началась работа сотрудников Института по трём Программам Президиума РАН:

- «Математическая теория управления», координатор – академик Н.Н. Красовский.
- «Научные основы эффективного природопользования, развития минерально-сырьевых ресурсов, освоения новых источников природного и техногенного сырья», координатор – академик Д.В. Рундквист.
- «Основы фундаментальных исследований нанотехнологий и наноматериалов», координатор – академик Ж.И. Алфёров.

Сотрудники Института участвуют также в двух Программах Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН:

- «Управление движением, теория сложных информационно-управляющих систем», сокоординаторы – академики С.Н. Васильев и А.Б. Куржанский.
- «Проблемы управления и безопасности энергетики и технических систем», сокоординаторы – академик Ф.Л. Черноусько и чл.-корр. РАН Н.А. Махутов.

Фундаментальные и прикладные исследования проводятся в Институте также в рамках трёх региональных Программ, в рамках 7-й рамочной Программы сотрудничества ЕС и России, по заказам Министерства обороны, Министерства внутренних дел, Федерального агентства по атомной энергии, Федерального космического агентства, Национального бюро Интерпола и многих других организаций и ведомств. Сотрудники Института участвуют в работах по 35-ти грантам Российского фонда фундаментальных исследований, пяти международным договорам.

В рамках Федеральной космической программы России на 2006–2015 гг. для создаваемой в ГКНПЦ им. М.В. Хруничева перспективной трёхступенчатой составной ракеты-носителя «Ангара» разработаны (применительно к версии «Ангара-А5») система управления расходом топлива и принципиально новая пневмогидравлическая система подачи топлива (ПГСП) с использованием новых непрерывных датчиков давления и алгоритмических средств диагностики и парирования отказов в каналах измерения и в исполнительных органах. Эти системы предназначены для существенного улучшения энергетических характеристик ракеты, поддержания антикавитационного режима работы жидкостного ракетного двигателя с соблюдением требований прочности топливных баков жидкостной ракеты. При построении системы управления расходом топлива и ПГСП использовались новые принципы, позволившие существенно расширить возможности применения ракетносителей, учитывались требования унификации ракетных блоков, входя-

щих в состав носителей. Были разработаны также программные и контрольные средства, используемые в технологической цепи создания и отработки бортового программного обеспечения ракетносителей. Разработаны новые принципы и алгоритмы действия бортовых систем кислородно-водородных разгонных блоков (КВРБ) перспективных ракетносителей тяжёлого класса для обеспечения существенного повышения длительности эксплуатации КВРБ в космическом пространстве (А.Я. Андриенко, В.П. Иванов).

В рамках Федеральной целевой программы «Уничтожение запасов химического оружия в Российской Федерации»

- на основе принципов современного комплексного контроля и анализа экологической ситуации в зоне техногенного воздействия объекта хранения и уничтожения химического оружия разработана, обоснована и реализована на трёх объектах методология построения систем производственного экологического мониторинга для объектов повышенного риска; с помощью оперативного и интеллектуального анализа данных разработаны методы, позволяющие решать задачи классификации, идентификации и прогнозирования экологических ситуаций;
- разработана и реализована методология построения компьютерных тренажёрных комплексов для выработки у оперативного персонала навыков безопасного и эффективного управления технологическими процессами путём воссоздания и анализа ситуаций, которые могут возникнуть как в штатном режиме, так и при неполадках и аварийных ситуациях (В.Г. Лебедев, Ю.С. Легович).

Институт имеет крупные контракты с отечественными и зарубежными фирмами, в том числе, связанными с инвестиционной деятельностью.

В 2007 г. в Институте созданы школы молодых учёных, развиваются другие формы интенсификации финансовой поддержки научных исследований молодых ученых. Воссоздан

Совет молодых ученых и специалистов, который активно включился в организацию и проведение различных конкурсов работ молодых ученых и молодежных научных конференций по проблематике Института. В Институте действует четыре диссертационных совета по восьми специальностям.

Ежегодно в Институте проводится ряд международных и всероссийских научных и научно-практических конференций и семинаров по различным направлениям теории управления. В их работе принимают участие сотни ведущих специалистов российской и мировой науки об управлении. В частности, в январе 2009 г. состоялась Международная мультikonференция «Теория и системы управления», организованная на базе трех институтов РАН: ИПУ, ИПМех и ИСА.

Сегодня, как и на протяжении всей своей славной истории, Институт остается лидером российской науки управления. Редколлегия, редакция и читатели журнала поздравляют Институт проблем управления и его сотрудников с юбилеем!

## **SEVENTY YEARS OF FORMATION AND EVOLUTION OF NATIVE CONTROL THEORY: INSTITUTE OF CONTROL SCIENCES IS 70**

*Abstract: The survey is devoted to the 70-th anniversary of Trapeznikov's Institute of Control Sciences of RAS (ICS RAS). It sketches the history of ICS, enumerates major current lines of inquiry, makes mention of famous scholars at various times worked in ICS, and refers to their contribution to the control theory and its applications.*

**Keywords:** Trapeznikov's Institute of Control Sciences of RAS, 70-th anniversary, history of Russian control theory.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым.*

УДК 532.546.3, 519.6  
ББК 33.361, 73

## **АНАЛИЗ СВЯЗНОСТИ ДИНАМИКИ НАГНЕТАТЕЛЬНЫХ И ДОБЫВАЮЩИХ СКВАЖИН**

**Надеждин О. В.<sup>1</sup>**

*(Санкт-Петербургский университет аэрокосмического приборостроения; ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа)*

**Заминова А. Р.<sup>2</sup>**

*(Уфимский государственный авиационный технический университет; ООО «РН-УфаНИПИнефть», Уфа)*

*Представлен способ идентификации параметров дискретной динамической системы в виде обобщённого настраиваемого объекта измерения (ОНОИ). Производится сравнительный анализ эффективности генетического и переборного алгоритмов для определения значения параметра фильтра состояния. Описано применение данного алгоритма для идентификации параметров системы, описывающей связанность динамики нагнетательных и добывающих скважин месторождения.*

Ключевые слова: идентификация динамических систем, метод обобщённого настраиваемого объекта измерения (ОНОИ), генетический алгоритм.

### **1. Введение**

Как известно, запасы нефти многих месторождений на сегодняшний день считаются истощёнными, большое число месторождений относится к категории трудно разрабатываемых.

---

<sup>1</sup> Надеждин Олег Владимирович, соискатель степени канд. техн. наук (NadezhdinOV@ufanipi.ru).

<sup>2</sup> Заминова Алина Рифкатовна, аспирант (ZaminovaAR@ufanipi.ru).

Поэтому значительная часть добычи обеспечивается за счет внедрения систем поддержания пластового давления (ППД) путем нагнетания воды. В процессе заводнения происходит увеличение неоднородности распределения фильтрационных потоков в пласте как по площади, так и по глубине, что может привести к преждевременному обводнению одних скважин и запаздыванию выработки других.

Таким образом, при разработке объектов нефтяных месторождений необходимо учитывать информацию о существующих фильтрационных потоках и гидродинамическом взаимодействии скважин.

В связи с этим возникла необходимость в разработке компьютерной системы по обнаружению, оценке и прогнозированию возникающих фильтрационных потоков.

## **2. Постановка задачи**

Необходимо провести анализ связности скважин, заключающийся в количественном определении воздействий нагнетательных скважин на добывающие. Воздействие может быть отражено в коэффициентах влияния для каждой пары скважин «нагнетание – добыча», или выражено в долях жидкости, поступающей от данной нагнетательной скважины к данной добывающей, в общем объеме закачиваемой в нагнетательную скважину воды.

В качестве исходных данных используются исторические дебиты добываемой и закачиваемой жидкости (данные ежемесячных замеров) и координаты скважин. У каждой скважины месторождения фиксируются периоды добычи и (или) нагнетания и определяется время начала и окончания каждого из таких периодов. Если у скважины за рассматриваемый период истории был изменён характер работы (обычно это переключение с добычи на нагнетание), то она рассматривается как две отдельные скважины с различными периодами эксплуатации.



В качестве алгоритма для идентификации полученной динамической системы использовались алгоритмы:

- РЕМ (*prediction error method*) – метод, реализованный в системе Matlab [6],
- ОНОИ (алгоритм на основе обобщённого настраиваемого объекта измерения) [1, 2, 4, 5].

По получаемым с использованием одного из алгоритмов идентификации данным о значениях параметров динамической системы впоследствии вычисляются вклады воздействующих нагнетательных скважин в продукцию каждой добывающей скважины.

### 3. Идентификация параметров динамической системы скважин

#### 3.1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Рассмотрим систему скважин месторождения как динамическую систему, на вход которой подаются дебиты закачки нагнетательных скважин, а на выходе – дебиты жидкости добывающих скважин.

Обозначим дебиты добывающих и закачивающих скважин, попавших в радиус взаимодействия, как

$$(1) \quad Y(t) = \begin{bmatrix} Prod_1(t) \\ Prod_2(t) \\ \dots \\ Prod_r(t) \end{bmatrix}; \quad U(t) = \begin{bmatrix} Inj_1(t) \\ Inj_2(t) \\ \dots \\ Inj_m(t) \end{bmatrix},$$

где  $r$  – число добывающих скважин  $Y$ ,  $m$  – число закачивающих скважин  $U$ ,  $t$  – номер замера во времени  $t = \overline{1, N}$ .

Поскольку существует инерция в процессе взаимодействия скважин между собой, то в качестве модели взаимосвязи добывающих и нагнетательных скважин в первом приближении можно рассмотреть систему дифференциальных уравнений порядка  $n$ :

$$(2) \quad \begin{cases} \frac{dX}{dt} = AX + BU, \\ \hat{Y} = CX + DU; X(t_0) = X_{ic}; \end{cases}$$

где  $A = \{n, n\}$ ,  $B = \{n, m\}$ ,  $C = \{r, n\}$ ,  $D = \{r, m\}$ , а  $X_{ic}$  – начальные условия [4].

Зная данные по истории добычи  $Y = [Y(t_1), \dots, Y(t_N)]$ ,  $U = [U(t_1), \dots, U(t_N)]$  и задаваясь порядком  $n$  системы дифференциальных уравнений (2), находим такие значения параметров матриц  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и начальных условий  $X_{ic}$ , чтобы была минимальной сумма квадратов ошибок:

$$(3) \quad J = \sum_{t=1}^N \left( Y(t) - \hat{Y}(t) \right)^2,$$

где  $N$  – число замеров.

На данном этапе исследований каждая добывающая скважина рассматривалась с группой из  $m$  закачивающих по отдельности, т. е.  $r = 1$ , а

$$(4) \quad Y(t) = [Prod_i(t)]; U(t) = \begin{bmatrix} Inj_1(t) \\ Inj_2(t) \\ \dots \\ Inj_m(t) \end{bmatrix}.$$

Таким образом, для каждой добывающей скважины с дебитом  $Prod_i(t)$  и группы закачивающих скважин с дебитами  $U(t)$  строилась своя модель (2).

### 3.2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМА ОНОИ

Для случая с одним выходом и несколькими входами решение задачи идентификации с использованием алгоритма ОНОИ будет следующим. Рассмотрим объект идентификации, динамика которого описывается матричным дифференциальным уравнением:

$$(5) \begin{cases} \dot{X} = AX + BU, \\ Y = CX + DU; \quad X(t_0) = X_{ic}; \end{cases}$$

где  $X = \{n, 1\}$ ,  $U = \{m, 1\}$ ,  $Y = \{1, 1\}$ .

Требуется по результатам наблюдений векторов входа и выхода  $U(t)$ ,  $Y(t)$  восстановить параметры системы (2) –  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  и  $X_{ic}$ . Переходя к операторному уравнению, заменив операцию дифференцирования на  $s = d/dt$ , получим уравнение:

$$(6) (a_{10} + a_{11}s + \dots + s^n)y_1 = (b_{101} + b_{111}s + \dots + b_{1n1}s^n)u_1 + \dots + (b_{10m} + b_{11m}s + \dots + b_{1nm}s^n)u_m + (c_{10} + c_{11}s + \dots + c_{1,n-1}s^{n-1})s1(t).$$

Пропустив выражение (6) через линейный фильтр  $1/G(s)$ , где  $G(s)$  – Гурвицев полином вида

$$(7) G(s) = (T_p s + 1)^n,$$

после разложения на простейшие слагаемые получим:

$$(8) \left(1 + \alpha_{11} \frac{1}{T_{\delta s+1}} + \dots + \alpha_{1n} \frac{1}{(T_{\delta s+1})^n}\right) y_1 = \left(\beta_{101} + \beta_{111} \frac{1}{T_{\delta s+1}} + \dots + \beta_{1n1} \frac{1}{(T_{\delta s+1})^n}\right) u_1 + \dots + \left(\beta_{10m} + \beta_{11m} \frac{1}{T_{\delta s+1}} + \dots + \beta_{1nm} \frac{1}{(T_{\delta s+1})^n}\right) u_m + s \left(\gamma_{11} \frac{1}{T_{\delta s+1}} + \dots + \gamma_{1n} \frac{1}{(T_{\delta s+1})^n}\right) 1(t).$$

Если обозначить

$$(9)$$

$$z_1 = y_1;$$

$$Y = \left[ \frac{1}{T_{\delta s+1}} \dots \frac{1}{(T_{\delta s+1})^n} \right]^T y;$$

$$Y_u = \left[ \left[ \frac{1}{T_{\delta s+1}} \dots \frac{1}{(T_{\delta s+1})^n} \right] u_1 \dots \left[ \frac{1}{T_{\delta s+1}} \dots \frac{1}{(T_{\delta s+1})^n} \right] u_r \left[ \frac{s}{T_{\delta s+1}} \dots \frac{s}{(T_{\delta s+1})^n} \right] 1 \right]^T;$$

$$A = [-\alpha_1 \quad -\alpha_2 \quad \dots \quad -\alpha_n];$$

$$B = [\beta_{01} \quad \beta_{11} \dots \beta_{n1} \quad \dots \quad \beta_{1m} \dots \beta_{nm} \quad \gamma_1 \quad \gamma_2 \quad \dots \quad \gamma_n]$$

то от уравнения (6) можно перейти к уравнению:

$$(10) z = [A \ B] \cdot \begin{bmatrix} Y \\ Y_u \end{bmatrix}.$$

После транспонирования (10) получим:

$$(11) \begin{bmatrix} Y^T & Y_u^T \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A^T \\ B^T \end{bmatrix} = z^T,$$

где данные искомого вектора  $\begin{bmatrix} A^T \\ B^T \end{bmatrix}$  находятся решением (11) по данным за все моменты времени МНК либо минимизацией квадрата мгновенной ошибки.

### **3.3. НАХОЖДЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРА ФИЛЬТРА**

Таким образом, использование линейного фильтра позволило свести минимизацию функционала (3) к решению системы уравнений (11). Но в общем случае оптимум, соответствующий минимуму ошибки в выражении (11), строго говоря, не обязан всегда совпадать с оптимумом исходной функции ошибки идентификации (3). В связи с этим, для улучшения качества оценивания параметров системы (2) неявной моделью (8) производится подбор значения фильтра  $T_p$ , минимизирующего ошибку идентификации (3).

Ниже будет представлен пример сравнения временной и вычислительной эффективности переборного и генетического алгоритма для поиска значения параметра фильтра  $T_p$ .

## **4. Расчёт воздействий нагнетательных скважин окружения на добывающую скважину**

### **4.1. ВЫБОР АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ ФИЛЬТРА**

Для анализируемой скважины для различных значений порядков по обучающей выборке данных вычислялись параметры динамической системы методами РЕМ и ОНОИ с настройкой

параметра фильтра генетическим алгоритмом (ГА) [3] и с использованием полного перебора. Алгоритм полного перебора и ГА тестировались на одном и том же диапазоне значений параметра фильтра. По полученным параметрам динамической системы рассчитывались суммарные отклонения действительных и рассчитанных дебитов добычи на обучающей и тестовой выборках. На вход динамической системы подавались данные истории по четырём нагнетательным скважинам, на выходе была получена расчётная динамика добычи одной добывающей скважины, история разработки анализировалась по 178 замерам.

Результаты суммарных отклонений для различных порядков представлены в таблице 1, где  $t$  – время выполнения алгоритма в секундах;  $err$  – суммарный коэффициент отклонения с экспериментально выбранными весовыми коэффициентами:

$err = p_1w_1 + p_2w_2$ ;  $w_1$  – суммарное отклонение на обучающей выборке,  $w_2$  – суммарное отклонение на тестовой выборке данных; веса были взяты равными  $p_1 = 1$  и  $p_2 = 1$ .

Таблица 1. Суммарные отклонения для различных алгоритмов

Порядок системы	РЕМ		ОНОИ с перебором		ОНОИ с ГА	
	$err$	$t$	$err$	$t$	$err$	$t$
1	428	0,41	1596	6,21	806	1,61
2	503	0,46	250	5,72	171	1,56
3	424	0,88	1228	6,56	1182	1,63
4	321	1,02	1351	6,14	255	1,63
5	772	1,61	1445	6,27	1318	1,89
6	577	1,18	1841	6,81	498	1,79
7	593	1,75	1406	6,85	492	1,81
8	453	1,65	1691	7,09	335	1,89

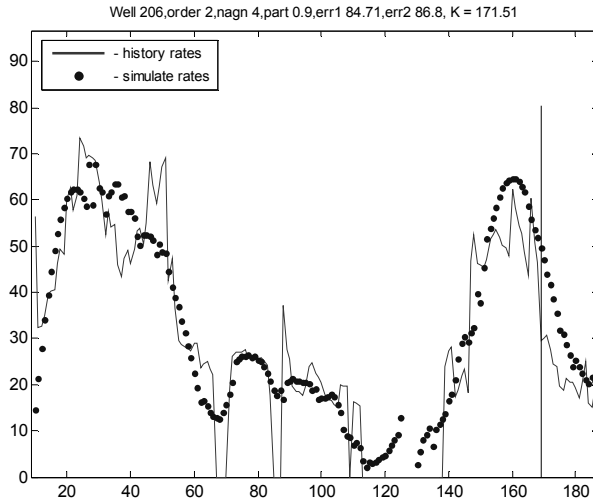


Рис. 1. Результат применения ОНОИ для системы порядка 2

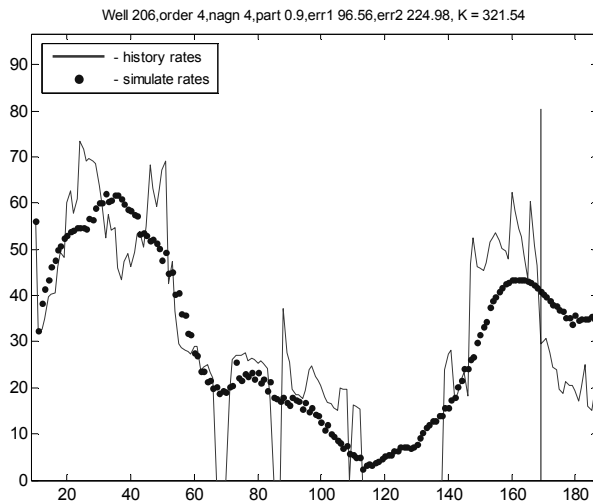


Рис. 2. Результат применения РЕМ для системы порядка 4

На рис. 1 и 2 представлены лучшие по точности найденного решения и времени поиска варианты выполнения алгоритма РЕМ и алгоритма ОНОИ с настройкой параметра фильтра с помощью ГА. Вертикальной чертой разделены дебиты скважины в обучающей и тестовой выборках в отношении 9:1, подробнее эти графики будут описаны при описании эксперимента в пункте 4.2.

На основании представленных результатов далее в поиске оптимальных входных параметров алгоритма для идентификации параметров динамической системы будет использоваться метод ОНОИ с настройкой параметра фильтра с помощью ГА.

#### *4.2. ОПТИМИЗАЦИЯ ВХОДНЫХ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ*

Вычисление вкладов в продукцию рассматриваемой скважины от каждой из воздействующих нагнетательных скважин можно представить в виде следующей схемы:

1) нахождение оптимальных значений для количества входов – воздействующих нагнетательных скважин – и порядка  $n$  идентифицирующей динамической системы по обучающей выборке данных;

2) моделирование новых исходных данных, где работает лишь одна из нагнетательных скважин (имеет ненулевые дебиты), эти данные подаются на вход построенной системы, на выходе получаем прогностические значения дебитов для исследуемой добывающей скважины;

3) по полученным значениям дебитов добычи в условиях работы отдельных нагнетательных скважин вычисляется вклад каждой участвующей нагнетательной скважины в добычу исследуемой добывающей.

Сначала вычисляется оптимальное значение радиуса окружения, определяющего число рассматриваемых воздействующих скважин, при котором сумма квадратов отклонения моделируемых дебитов рассматриваемой скважины от их исторических значений будет минимальной, см. таблицу 2.

Таблица 2. Выбор значения радиуса окружения на примере скважины № xxx ууу-го месторождения

Радиус отбора, м	424	424	510	583	762	860	894	949
Число скважин	1	2	3	4	5	6	7	8
Миним. ошибка	201	242	428	171	228	358	1059	348
Соотв. порядок	2	1	4	2	2	2	3	2
Устойчивость	1	0	1	1	1	1	0	1

Для каждого значения радиуса согласно приведенному выше алгоритму вычислялся оптимальный порядок системы – порядок, при котором минимальна ошибка отклонения (3). Рассмотрим результаты расчётов для радиуса окружения, позволяющего получить наименьшее значение суммарной ошибки, см. рис.1.

Для расчёта суммарной ошибки данные истории разбиваются на две выборки: обучающая (в данных расчётах для неё бралось 90% исходных данных) и тестовая (оставшиеся 10% данных). Для каждой динамической системы, построенной по выбранным параметрам радиуса окружения и порядка, оценивается, насколько близок прогноз после обучения к данным тестовой выборки. Данные обучения и тестирования на графиках разделены вертикальной линией, сплошная линия показывает исторические значения дебитов, точками показаны рассчитанные месячные дебиты добычи, см. рис. 1.

Далее, для каждой нагнетательной скважины окружения составляется такой набор входных данных дебитов, в котором только эта нагнетательная скважина работает с некоторым постоянным усреднённым дебитом, у остальных же нагнетательных скважин дебиты нулевые. Тогда на выходе получаем прогноз дебитов добывающей скважины, обусловленных воздействием каждой из нагнетательных скважин выбранного окружения в отдельности, см. таблицу 3.



Таблица 3. Прогнозируемые дебиты добычи для отдельного нагнетания

Индекс нагн. скважины	Свободный приток	1	2	3	4
Номер нагн. скважины		15	21	105	106
Дебит без учёта притока, м <sup>3</sup> /сут.	67	8	-19	30	-6

Для нагнетательных скважин с неотрицательными прогнозами добычи составим распределительную диаграмму, см. рис. 3. Рассчитав прогностические дебиты нагнетательных скважин для различных значений радиуса окружения, можно выделить группу скважин, оказывающих относительно стабильное положительное воздействие на продукцию данной добывающей скважины и оценить это воздействие количественно.

## 5. Результаты работы

В ходе выполнения данной работы была проведена адаптация метода ОНОИ для применения к задаче идентификации воздействия динамики нагнетания жидкости на динамику добычи. Приведённые эксперименты показали, что при данном соотношении количества входов, выходов системы и данной размерности входов метод ОНОИ с настройкой параметров фильтра генетическим алгоритмом превосходит метод РЕМ по точности получаемого данным методом решения и незначительно уступает по времени выполнения.

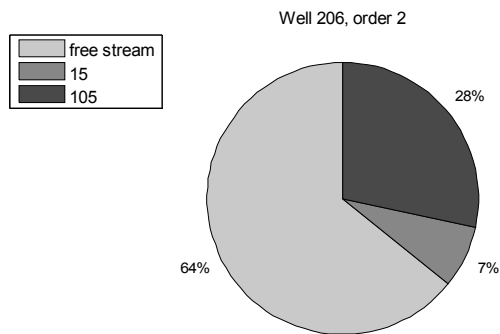


Рис. 3. Распределение неотрицательных дебитов

### Литература

1. АЛЕКСАНДРОВ А. Г. *Оптимальные и адаптивные системы*. – М.: Высшая школа, 1989. – 256 с.
2. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р. *Избранные главы теории автоматического управления с примерами в системе MatLab* / Б. Р. Андриевский, А. Л. Фрадков. – СПб.: Наука, 1999. – 471 с.
3. Гладков Л. А. *Генетические алгоритмы* / Под ред. В. М. Курейчика ; 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2006. – 320 с.
4. КАТКОВ М. С. *Непрерывные системы адаптивного управления с идентификаторами*. – М.: Издательство МНИ "Мир книги", 1992. – 386 с.
5. ЭЙКХОФФ П. *Основы идентификации систем управления. Оценивание параметров и состояния*: пер. с англ. / Под ред. Н. С. Райбмана. – М.: Мир, 1975. – 683 с.

6. LJUNG, L. System identification. Theory for user. Second edition. – Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J., 2nd edition, 1999. – 609 p.

## THE ANALYSIS OF CONNECTIVITY OF INJECTION AND PRODUCTION WELLS DYNAMICS

**Oleg Nadezhdin**, Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, OOO 'RN-UfaNIPIoil', Ufa, (NadezhdinOV@ufanipi.ru).

**Alina Zaminova**, Ufa state aviation technical university, OOO 'RN-UfaNIPIoil', Ufa, (ZaminovaAR@ufanipi.ru).

*Abstract: The way of discrete dynamic system parameters identification in the form of the generalized adjusted object of measurement is considered. Contrastive analysis of genetic algorithm and exhaustive search efficacy in finding filter parameter's value is completed. The example is adduced of algorithm application for identification of wells connectivity system parameters.*

Keywords: dynamic systems identification, method of generalized adjusted object of measurement, genetic algorithm.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.А. Уткиным.*

УДК 62.50  
ББК Ж 30

## **АДАПТИВНАЯ синхронизация нелинейных систем одного класса при ограниченной пропускной способности канала связи**<sup>1</sup>

**Андриевский Б. Р.**<sup>2</sup>

**Фрадков А. Л.**<sup>3</sup>

*(Учреждение Российской академии наук Институт проблем машиноведения Российской академии наук, Санкт-Петербург)*

*Предложен метод адаптивной синхронизации нелинейных систем Лурье с пассивируемой линейной частью через канал связи с ограниченной пропускной способностью и кодером первого порядка. Показано применение метода для адаптивной синхронизации хаотических систем Чуа. Получены численные характеристики процесса синхронизации при различной скорости передачи информации по каналу. Продемонстрирована возможность использования предложенного метода для передачи информации модуляцией хаотического сигнала.*

**Ключевые слова:** адаптивная синхронизация, нелинейные системы, канал связи, информационные ограничения.

---

<sup>1</sup> Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№06-08-01386, 08-01-00775) и Совета по грантам Президента РФ для поддержки молодых ученых и ведущих научных школ, проект НШ-2387.2008.1. Авторы признательны проф. Робину Дж. Эвансу (Robin J. Evans) из Университета Мельбурна за ряд предложений по теме работы и полезное обсуждение результатов.

<sup>2</sup> Андриевский Борис Ростиславич, доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, (bandri@yandex.ru).

<sup>3</sup> Фрадков Александр Львович, доктор технических наук, заведующий лабораторией, (fradkov@mail.ru).

## **Введение**

В последнее время среди специалистов в области систем управления наблюдается растущий интерес к задачам оценивания и управления, в которых существенны ограничения на информационные потоки между отдельными элементами системы (т.е. ограничения, вызванные конечной пропускной способностью каналов связи в системе). Подобные задачи возникают во многих технических приложениях, таких как навигационные системы, распределенные сенсорные сети, системы дистанционного наблюдения, и других. Рядом исследовательских групп проводится интенсивное изучение предельных возможностей решения задач управления при наличии указанных ограничений, см. например, работы [26, 30–32]. Задача управления с ограничениями информационных потоков рассматривается как в детерминистской [28], так и в стохастической [29] постановках. Ограниченность скорости передачи данных с использованием кодеров (квантователей) сигнала и его передачи по дискретному каналу связи, входящему в состав замкнутого контура, приводит к рассмотрению системы как *гибридной*, что усложняет исследование протекающих в ней процессов [24, 32].

В большинстве работ рассматриваются задачи управления и оценивания состояния для линейных стационарных систем, и лишь в немногих статьях [25, 27] рассматриваются нелинейные системы. В работе [27] предлагается общий и плодотворный подход к исследованию подобных систем, основанный на понятии *топологической энтропии при обратной связи* (ТЭОС) (*Topological Feedback Entropy*). В указанной работе получены условия, при выполнении которых для замкнутой дискретной системы, содержащей информационный канал с ограниченной пропускной способностью в обратной связи, обеспечивается инвариантность заданного компактного множества в пространстве состояний. Показано, что нижняя граница пропускной способности канала связи, при которой возможно решение задачи, совпадает с ТЭОС

разомкнутой системы (объекта управления).

Известные в настоящее время результаты достаточно полно охватывают задачи стабилизации систем относительно заданного состояния равновесия. Однако для других важных задач решения подобных вопросов еще не получено. Например, для задач слежения за задающим воздействием, в которых желаемое состояние объекта изменяется во времени, точной нижней границы для скорости передачи информации, при которой возможно стремление к нулю ошибки слежения, пока не найдено. Кроме того, известные публикации обычно опираются на использование весьма громоздких процедур кодирования–декодирования в канале связи. Поэтому представляется важным при нахождении точных теоретических границ допустимой пропускной способности канала связи учитывать возможности практической реализации оптимальных процедур кодирования–декодирования.

В ряде технических приложений (например, в распределенных сенсорных сетях или в системах дистанционного наблюдения) часто отсутствует возможность установить усовершенствованный датчик, включающий устройство оценивания состояния объекта, на стороне передатчика (например, на стороне объекта, за которым производится наблюдение), и только значения некоторого выходного процесса доступны измерению и передаче по каналу связи для последующей обработки. В данной работе рассматривается подобная ситуация и исследуются возможности и ограничения, которые возникают в ней при решении задачи оценивания состояния, если используется кодирующее устройство с глубиной памяти, равной единице. Выбор кодеров этого класса позволил выполнить как аналитическое исследование, так и численный анализ.

Решение задачи становится существенно более сложным для нелинейных систем, при неполноте измерений состояния, а также в условиях параметрической неопределенности модели объекта (модели источника сигнала). В частности, для

таких задач, как *частичная стабилизация*, или *стабилизация многообразий* почти ничего неизвестно относительно предельных возможностей по оцениванию состояния и управлению при ограниченной пропускной способности канала связи. Подобные проблемы возникают в задачах стабилизации предельных циклов и хаотических аттракторов [23], которые имеют большое значение для управления колебательными режимами в технических системах. К подобным задачам относятся задачи управления и оценивания состояния хаотических систем [3, 19], для которых характерна локальная неустойчивость всех траекторий. Однако аналитические оценки процессов в хаотических системах получены к настоящему времени только для некоторых случаев и без учета информационных ограничений, см., например, [10, 11, 20]. Развитие этих результатов требует привлечения изощренной математической техники. Дополнительные аналитические сложности возникают при наличии параметрической неопределенности, что заставляет иногда прибегать к методам адаптивного управления, реализация которых приводит к усложнению модели системы в целом. Наконец, следует учесть гибридный (непрерывно-дискретный) характер замкнутой системы, в составе которой имеются кодирующее–декодирующее устройства с цифровым каналом передачи данных.

В данной работе исследуется адаптивная синхронизация хаотических систем при наличии ограничений на скорость передачи информации в канале связи в предположении, что ряд параметров генератора сигнала («ведущей системы») неизвестен, и только выход (а не состояние) генератора измеряется. Для систем без учета информационных ограничений данная задача решалась в работах [12, 22] путем применения *адаптивных наблюдателей состояния*. Показана также возможность применения такого метода синхронизации для передачи сообщений модулированием хаотического сигнала. На основе публикаций [12, 21, 22] и недавно полученных результатов по неадаптивной синхронизации хаотических систем на основе

наблюдателей при информационных ограничениях [8, 17, 18] в данной работе находятся аналитические оценки характеристик замкнутой системы, а также приведены результаты численного исследования синхронизации хаотических систем Чуа с учетом ограниченной пропускной способности канала связи.

## **1. Постановка задачи и описание метода синхронизации**

Рассмотрим нелинейную систему с неопределенными параметрами («генератор», или «ведущая система»), описанную следующими уравнениями состояния

$$(1) \quad \dot{x} = Ax + \varphi_0(y) + B \sum_{i=1}^m \theta_i \varphi_i(y), \quad y = Cx,$$

где  $x \in \mathbb{R}^n$  – вектор состояния генератора;  $y \in \mathbb{R}^l$  – вектор выходов (передаваемых через канал связи);  $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_m]^T$  – вектор параметров генератора. Вид нелинейных зависимостей  $\varphi_i(\cdot)$  ( $i = 0, 1, \dots, m$ ), значения матриц  $A$ ,  $C$  и вектора  $B$  считаются известными. Также считаем, что лишь значения выходного сигнала  $y(t)$  (а не всего вектора состояния) могут быть измерены датчиками. Полагаем, что начальное состояние генератора  $x_0 = x(0)$  также априорно неизвестно на стороне приемника (ведомой системы). Заметим, что для систем связи с модулированием хаотического сигнала вектор неизвестных параметров  $\theta$  меняется во времени, и сигнал  $\theta = \theta(t)$  является передаваемым сообщением, которое должно быть восстановлено приемником. Далее предполагается, что вектор  $\theta(t)$  изменяется достаточно медленно по сравнению с другими процессами в системе, поэтому  $\theta$  считается неизвестным постоянным вектором параметров ведущей системы.

Для достижения синхронизации между ведущей и ведомой системами используем метод построения адаптивных наблюдателей, изложенный в [1, 2, 4, 9, 21, 22], на основе которого получена следующая структура системы синхронизации [18].



Адаптивный наблюдатель состоит из *настраиваемого наблюдателя* и *блока адаптации (адаптора)*. Настраиваемый наблюдатель описывается уравнениями

$$(2) \quad \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \varphi_0(y) + B \sum_{i=1}^m \hat{\theta}_i \varphi_i(y) + L(y - \hat{y}), \quad \hat{y} = C\hat{x},$$

где  $\hat{x} \in \mathbb{R}^n$  – вектор состояния наблюдателя;  $\hat{y} \in \mathbb{R}^l$  – вектор выходных переменных;  $\hat{\theta}_i, i = 1, 2, \dots, m$  – скалярные настраиваемые параметры наблюдателя. Настройка параметров производится адаптором, для синтеза которого используется метод скоростного градиента [7]. Алгоритм адаптации имеет вид

$$(3) \quad \dot{\hat{\theta}}_i = -\gamma_i(y - \hat{y})\varphi_i(y), \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

где коэффициенты  $\gamma_i > 0$  – параметры алгоритма адаптации.

Алгоритм адаптивного наблюдателя (2), (3) отличается от предложенного в работе [22] тем, что в нем отсутствует адаптивная настройка обратной связи по ошибке  $(y - \hat{y})$ , вместо которой в (2) вводится линейная стационарная корректирующая связь  $L(y - \hat{y})$ , что позволяет уменьшить число настраиваемых параметров адаптивного наблюдателя (2), (3) по сравнению с рассмотренным в [22].

В присутствии ошибок канала связи между ведущей и ведомой системами (в которые могут также входить ошибки измерений, искажения в канале связи и ошибки кодирования, вызванные конечной пропускной способностью канала связи), измеряемый выход  $y(t)$  искажается, что можно представить как изменение входа наблюдателя в виде

$$(4) \quad \bar{y}(t) = y(t) + \delta_y(t),$$

где через  $\delta_y(t)$  обозначено общее искажение сигнала измерений в аддитивной форме. В этом случае предлагается использовать регуляризованную версию адаптивного наблюдателя, которая

описывается уравнениями

$$(5) \quad \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + \varphi_0(\bar{y}) + B \sum_{i=1}^m \hat{\theta}_i \varphi_i(\bar{y}) + L(\bar{y} - \hat{y}), \quad \hat{y} = C\hat{x},$$

$$(6) \quad \dot{\hat{\theta}}_i = -\gamma_i(\bar{y} - \hat{y})\varphi_i(\bar{y}) - \alpha_i\hat{\theta}_i, \quad i = 1, 2, \dots, m,$$

где  $\alpha_i$  – коэффициенты регуляризации.

В данной работе под синхронизацией понимается сходимость траекторий  $x(t)$  и  $\hat{x}(t)$ , при которой достаточно мала ошибка синхронизации  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ . Вследствие ошибок в канале связи, стремление вектора  $e(t)$  к нулю не может быть обеспечено, и цель синхронизации имеет смысл представить в виде

$$(7) \quad Q \leq \Delta_x,$$

где  $\Delta_x$  – заданная верхняя граница асимптотического значения ошибки, а величина

$$(8) \quad Q = \overline{\lim}_{t \rightarrow \infty} \|x(t) - \hat{x}(t)\|,$$

является предельной ошибкой синхронизации.

*Замечание 1.* Хотя цель синхронизации (7) может быть формально отождествлена с целью стабилизации невязки  $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$  с заданной точностью  $\Delta_x$ , имеется ряд существенных отличий между задачами стабилизации, слежения и синхронизации, что заставляет отнести эти задачи к разным классам [5, 13]. В отличие от задач стабилизации, целью которых является приведение всех переменных состояния в окрестность заданной точки (обычно – начала координат) и затуханию процессов в системе, при достижении синхронизации процессы в ведущей и ведомой системах продолжают, но протекают синхронно. Говоря математическим языком, здесь обеспечивается движение в окрестности многообразия  $e \equiv 0$ . В свою очередь, в задачах слежения задающее (командное)

воздействие является, как правило, внешним произвольным процессом, подчиняющимся определенным ограничениям (по амплитуде, скорости изменения, частотному диапазону и т. д.). В задачах синхронизации «задающее» воздействие  $y(t)$  не произвольно, а генерируется ведущей системой, динамика которой в определенном смысле близка к динамике ведомой системы.

В данной статье рассматривается задача определения границ параметров системы и скорости передачи информации по каналу связи, при которых обеспечивается граница (7) на качество процесса синхронизации. Вопрос о принципиальной разрешимости задачи (7) для системы (1), (5), (6) исследован в [18] в предположении о равномерной ограниченности ошибки  $\delta_y(t)$  (см. (4)):

$$(9) \quad \|\delta_y(t)\| \leq \Delta \quad \text{для всех } t \geq 0.$$

где  $\Delta$  – некоторая известная константа.

Далее для простоты описания считаем выход скалярным,  $l = 1$ ,  $\gamma_i \equiv \gamma > 0$ ,  $\alpha_i \equiv \alpha > 0$ . Как показано в [18], если выполнены следующие условия:

- A1. Матрица коэффициентов передачи наблюдателя  $L$  такова, что передаточная функция

$$W_L(\lambda) = C(\lambda \mathbf{I} - A + LC)^{-1} B$$

строго пассивна, т. е. выполнены неравенства

$$\operatorname{Re} W_L(i\omega) > 0 \quad \forall \omega \geq 0,$$

$$(10) \quad \lim_{\omega \rightarrow \infty} \omega^2 \operatorname{Re} W_L(i\omega) > 0.$$

- A2. Система (1) имеет ограниченное инвариантное множество  $\Omega_\theta \subset \mathbb{R}^n$  при любом  $\theta \in \Theta \subset \mathbb{R}^m$ , где  $\Theta$  – множество возможных значений неопределенных параметров и  $x(0) \in \Omega$ .

А3. Функции  $\varphi_i(y)$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$  ограничены и удовлетворяют условию Липшица в замкнутой  $\Delta$ -окрестности  $\Omega_\theta$ , т. е. неравенства

$$(11) \quad |\varphi_i(y)| \leq L_\varphi, \quad |\varphi_i(y') - \varphi_i(y)| \leq L'_\varphi$$

выполнены при некоторых  $L_\varphi, L'_\varphi$  и всех  $y = Cx$ ,  $x \in S_\Delta(\Omega_\theta)$ , где  $S_\Delta(\Omega_\theta) = \{x : \exists z \in \Omega_\theta : \|x - z\| \leq \Delta\}$ ,

то существуют такие  $C_1 > 0$ ,  $C_2 > 0$ , что для всех  $\Delta > 0$  выбор параметров алгоритма  $\alpha = \Delta^2$ ,  $\gamma = C_2/\Delta^2$  гарантирует достижимость цели синхронизации (7) где

$$(12) \quad \Delta_x = C_1\Delta.$$

*Замечание 2.* Согласно версии теоремы о пассивации для наблюдателей [16], вектор  $L$ , удовлетворяющий условию  $AI$ , существует тогда, и только тогда, когда передаточная функция  $W(\lambda) = C(\lambda I - A)^{-1}B$  является гиперминимальнофазовой (ГМФ), т. е. если многочлен  $A(\lambda) \det W(\lambda)$  (где  $A(\lambda) = \det(\lambda I - A)$ ) – гурвицев (все его корни имеют отрицательные вещественные части), а матрица  $G = \lim_{\lambda \rightarrow \infty} \lambda W(\lambda)$  симметрична и

положительно определена. Для рассматриваемого здесь случая скалярного выхода,  $l = 1$ , передаточная функция  $W(\lambda) = C(\lambda I - A)^{-1}B$  скалярна и выражается отношением многочленов  $A(\lambda), B(\lambda)$ :  $W(\lambda) = B(\lambda)/A(\lambda)$ . Тогда условие ГМФ означает, что числитель  $B(\lambda)$  – гурвицев многочлен степени  $n - 1$  с положительным коэффициентом при старшей степени [6].

*Замечание 3.* Заметим, что из условия ГМФ следует *обнаруживаемость* пары  $(A, C)$ . Действительно, если пара  $(A, C)$  не обнаруживаемая, то передаточная функция  $W(\lambda) = B(\lambda)/A(\lambda)$  имеет совпадающие нули и полюса с положительными вещественными частями, что противоречит требованию гурвицевости многочлена  $B(\lambda)$ . Наблюдаемости пары  $(A, C)$  не требуется: при выполнении указанных выше условий ненаблюдаемые компоненты вектора ошибки предельно ограничены и цель (7) выполняется.

## 2. Процедуры кодирования

Рассмотрим сначала статический кодер (кодер без памяти) с равномерной дискретизацией на неизменном диапазоне значений.

Зададим вещественное число  $M > 0$  и неотрицательное целое  $\nu \in \mathbb{Z}$ , в соответствии с которыми процедура кодирования определяется как масштабирующее отображение равномерного квантования по уровню  $q_{\nu, M} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}$  следующим образом. Введем диапазон преобразования  $\mathcal{I} = [-M, M]$  длиной  $2M$  и шаг квантования длины  $\delta = 2^{1-\nu}M$ . Функцию кодирования (квантования)  $q_{\nu, M}(y)$  определим после этого как

$$(13) \quad q_{\nu, M}(y) = \begin{cases} \delta \cdot \langle \delta^{-1}y \rangle, & \text{если } |y| \leq M, \\ M \operatorname{sign}(y), & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $\langle \cdot \rangle$  – функция округления до ближайшего целого,  $\operatorname{sign}(\cdot)$  – сигнум-функция:  $\operatorname{sign} y = \{1 \text{ при } y \geq 0 | -1 \text{ при } y < 0\}$ . Очевидно, что  $|y - q_{\nu, M}(y)| \leq \delta/2$  для всех  $y$  таких, что  $|y| \leq M + \delta/2$  и все значения  $q_{\nu, M}(y)$  принадлежат диапазону преобразования  $\mathcal{I}$ . Заметим, что интервал  $\mathcal{I}$  разбивается равномерно на  $2^\nu$  частей. Следовательно, количество элементов образа отображения  $q_{\nu, M}$  равно  $2^\nu + 1$ , следовательно, каждое кодовое слово содержит  $R = \log_2(2^\nu + 1)$  бит информации.

Итак, для рассматриваемого кодера происходит дискретизация (квантование по уровню) выхода источника сигнала (в нашем случае – генератора (1)) по формуле  $\bar{y} = q_{\nu, M}(y)$ . Мы предполагаем, что как кодирующее, так и декодирующее устройства работают на основе одной и той же информации, и, следовательно, сигнал  $\bar{y}$  однозначно восстанавливается декодером на основе полученного кодового слова.

В ряде статей, см. например [14, 24, 28, 30], описана более совершенная схема кодирования. Лежащая в основе этой схемы идея состоит в уменьшении параметра  $M$ ,

задающего диапазон преобразования, с одновременным заменой симметричного интервала  $\mathcal{I}$  на интервал  $\mathcal{Y}_{k+1}$ , который охватывает некоторую область относительно предсказанного по предыдущим измерениям значения выхода генератора  $y_{k+1}$  на  $(k+1)$ -м шаге наблюдений,  $y_{k+1} \in \mathcal{Y}_{k+1}$ . Если длина интервала  $\mathcal{Y}_{k+1}$  мала по сравнению с полным диапазоном изменения выхода  $y$ , то можно уменьшить величину  $M$  и, следовательно, уменьшить шаг квантования  $\delta$ , не увеличивая при этом количество бит информации, передаваемых по каналу связи в единицу времени. Для реализации этой идеи используются кодирующие устройства с памятью. Наличие переходных режимов в системе приводит к изменению параметра  $M$  во времени на каждом такте (шаге)  $k$  передачи данных,  $M = M_k$ , что соответствует изменению масштаба изображения в оптических системах. Такой подход позволяет повысить точность кодирования данных в установившемся режиме, в то же время предотвращая насыщение кодирующего устройства в начале процесса. Последовательность  $\{M_k\}$  может быть рассчитана заранее и вводиться программно (так называемое «изменение масштаба, управляемое временем»), либо  $M_k$  могут вычисляться рекуррентно на основе текущих измерений («изменение масштаба, управляемое событиями») [24].

В данной работе используется простейший кодер такого типа, с глубиной памяти, равной единице, и программным изменением масштаба квантования. Рассмотрим подробнее соответствующую процедуру кодирования.

Кодирование и передача данных через канал связи происходит в дискретные моменты времени  $t_k = kT_0$ , где  $k = 0, 1, 2, \dots$  – номер шага,  $T_0$  – выбранный *интервал квантования по времени* (интервал выборки). Выходной сигнал  $y(t)$  генератора (ведущей системы) измеряется чувствительным элементом и по формуле  $y_k = y(kT_0)$  преобразуется в дискретную последовательность  $\{y_k\}$ . Введем последовательность значений *смещения*  $c_k$  ( $k = 0, 1, 2, \dots$ ), имеющих нулевое начальное значение,  $c_0 = 0$ . На  $k$ -ом шаге работы кодер сравнивает текущее

значение  $y_k$  со смещением  $c_k$ , выработанным на предыдущем шаге и получает сигнал рассогласования  $\partial y_k = y_k - c_k$ . Этот сигнал затем подвергается квантованию по уровню с заданной разрядностью  $\nu$  и текущим значением  $M = M_k$  в соответствии с (13). Выходной сигнал кодера

$$(14) \quad \bar{\partial}y_k = q_{\nu, M_k}(\partial y_k)$$

передается через канал связи в виде символа, содержащего  $R$  бит информации из выбранного алфавита <sup>4</sup>. Далее, смещение  $c_{k+1}$  и параметр масштаба  $M_k$  пересчитываются на основе имеющихся исходных данных и модели источника (генератора) сигнала  $y(t)$ . Предполагая, что выход генератора  $y$  изменяется мало на промежутке квантования по времени  $T_0$ , т. е. что  $y_{k+1} \approx y_k$ , и используя временное изменение масштаба, можно предложить следующие алгоритмы пересчета параметров кодирующего устройства:

$$(15) \quad c_{k+1} = c_k + \bar{\partial}y_k, \quad c_0 = 0, \quad k = 0, 1, \dots,$$

$$(16) \quad M_k = (M_0 - M_\infty)\rho^k + M_\infty,$$

где  $0 < \rho \leq 1$  – параметр затухания,  $M_\infty$  – асимптотически предельное значение  $M_k$ . Начальное значение  $M_0$  должно быть достаточно большим, чтобы охватить всю область начальных значений выхода  $y_0$  <sup>5</sup>.

Уравнения (13), (14), (16) описывают алгоритм работы кодирующего устройства. Аналогичные соотношения

<sup>4</sup> Фактически передается не само значение  $\bar{\partial}y_k$ , а его нормированная величина  $\langle \delta^{-1} \bar{\partial}y_k \rangle$ , которая при известных  $\nu$  и  $M_k$  очевидным образом пересчитывается на приемном конце в  $\bar{\partial}y_k$ .

<sup>5</sup> Это требование можно смягчить, если выходной сигнал генератора ограничен по модулю. Тогда, при  $M_\infty > 0$ , даже если  $M_k < |y_k|$ , за конечное время происходит «схватывание» сигнала  $y(t)$  кодером. Следует правда учесть, что при малых  $M_k$  длительность переходного режима может оказаться недопустимо большой.

реализуются декодером: а именно, в нем вычисляются значения  $\tilde{c}_k$ ,  $\tilde{M}_k$  на основе текущего потока кодовых слов, соответствующих переданным через канал связи значениям  $\bar{\delta}y_k$  по формулам

$$(17) \quad \tilde{c}_{k+1} = \tilde{c}_k + \bar{\delta}y_k, \quad c_0 = 0, \quad k = 0, 1, \dots,$$

$$(18) \quad \tilde{M}_k = (M_0 - M_\infty)\rho^k + M_\infty.$$

В результате декодирующее устройство формирует на выходе сигнал

$$(19) \quad \tilde{y}_k = \tilde{c}_k + \bar{\delta}y_k,$$

который совпадает с квантованным сигналом  $\bar{y}_k$  (как указано выше, мы здесь учитываем только ограниченную пропускную способность канала связи, пренебрегая возможными искажениями и потерей информации в нем). Далее значение  $\tilde{y}_k$  «расширяется» экстраполятором нулевого порядка на весь интервал квантования по времени  $[kT_0, (k+1)T_0)$  и на выходе декодирующего устройства формируется процесс непрерывного времени  $\tilde{y}(t)$ , являющийся входным сигналом второй, ведомой, подсистемы.

### 3. Оптимизация кодера

Установим теперь зависимость между скоростью передачи информации по каналу связи и гарантированно достижимой точностью работы пары кодирующее – декодирующее устройства в предположении, что скорость изменения сигнала  $y(t)$  равномерно ограничена по модулю. Очевидно, точная оценка  $L_y$  для скорости  $y(t)$  находится как  $L_y = \sup_{x \in \Omega} |C\dot{x}|$ , где  $\dot{x}$  получается

в соответствии с (1). Чтобы исследовать точность системы кодер – декодер, оценим верхнюю границу  $\Delta = \sup_t |\delta_y(t)|$  ошибки



$\delta_y(t) = y(t) - \bar{y}(t)$  передачи данных по каналу связи. Рассмотрим промежуток квантования  $[kT_0, (k+1)T_0)$ . Очевидно, что при выбранной схеме кодирования величина  $|\delta_y(kT_0)|$  не превосходит  $\delta/2$ . Кроме того, ошибка может возрасти внутри указанного интервала с момента  $kT_0$  до  $(k+1)T_0$  вследствие изменения  $y(t)$ . Величина этого изменения, исходя из сделанного выше предположения, не превосходит  $\sup_{kT_0 < t < (k+1)T_0} |y(t) - y(kT_0)| \leq$

$$\int_{kT_0}^{(k+1)T_0} |\dot{y}(\tau)| d\tau \leq \int_{kT_0}^{(k+1)T_0} L_y d\tau = L_y T_0. \text{ Таким образом, на}$$

каждом интервале  $[kT_0, (k+1)T_0]$  суммарная ошибка передачи данных удовлетворяет неравенству:

$$(20) \quad |\delta_y(t)| \leq \frac{\delta}{2} + L_y T_0$$

Неравенство (20) показывает, что для того, чтобы получить заданную точность  $\Delta$  передачи данных, т. е. чтобы обеспечить выполнение неравенства  $|\delta_y(t)| \leq \Delta$  для всех  $t$ , требуется, чтобы интервал квантования  $T_0$  удовлетворял условию

$$(21) \quad T_0 < \frac{\Delta}{L_y}.$$

Далее, если условие (21) выполнено, то заданные границы ошибки кодирования гарантируются при правильно выбранном шаге квантования по уровню  $\delta$ , а именно – при соблюдении условия  $\delta < 2\Delta - 2L_y T_0$ . Отсюда мы получаем нижнюю границу для скорости передачи информации в битах в секунду <sup>6</sup> :

<sup>6</sup> Напомним, что скорость передачи информации связана с диапазоном кодирования и интервалом квантования соотношением  $R = \log_2 \left( \frac{2M}{\delta} + 1 \right)$ .

значение  $R$  должно удовлетворять неравенству

$$(22) \quad R \geq \log_2 \left( \frac{M}{\Delta - L_y T_0} + 1 \right).$$

Таким образом, кодер, имеющий величину диапазона кодирования, равную  $2M$ , шаг квантования по уровню  $\delta$  и длительность интервала дискретизации по времени  $T_0$ , обеспечивает общую ошибку, ограниченную по модулю заданной величиной  $\Delta$ , если выполнено неравенство (21) и скорость передачи информации удовлетворяет условию (22). Из неравенств (21), (22) следует также, что при достаточно малом  $T_0$  и достаточно большой  $R$  можно достичь произвольно малой заданной границы ошибки  $\Delta$ .

Оптимизируем теперь параметры кодера с тем чтобы получить наименьшую возможную для заданной пропускной способности  $R$  канала связи границу ошибки  $\Delta$  или чтобы при заданной  $\Delta$  минимизировать потребное значение  $R$ . Как следует из (22), уменьшение диапазона кодирования  $2M$  приводит к снижению количества бит передаваемой за единицу времени информации  $R$  и, следовательно, потребной пропускной способности канала связи  $R^*$ . С другой стороны, чтобы предотвратить насыщение кодирующего устройства, величина  $M$  не должна быть меньше чем  $\sup_{k \in \mathbb{Z}} |\delta_y(kT_0)| - \delta/2 = \Delta - \delta/2$ .<sup>7</sup>

Принимая во внимание, что  $\delta = 2^{1-\nu}M$ , получим следующую формулу для наименьшего допустимого  $M$ :

$$(23) \quad M = \frac{2^\nu}{2^\nu + 1} \Delta.$$

*Замечание 4.* В начальной стадии работы системы величина ошибки  $|\delta_y|$  может превосходить границу  $\Delta$  из-за того, что

<sup>7</sup> См. сноску 5 на стр. 59.

начальное значение  $y(0)$  неизвестно. Это приводит к появлению переходных режимов в поведении системы. На этой стадии может быть эффективно использована описанная выше процедура изменения масштаба, что приводит к следующему рецепту выбора параметров закона (16):

$$(24) \quad M_0 = M_y, \quad M_\infty = \frac{2^\nu \Delta}{2^\nu + 1},$$

где  $M_y = \sup_{x_0 \in \Omega} |y(t)|$ .

Оптимизируем теперь кодер по интервалу выборки  $T_0$ .

Рассмотрим установившийся режим, в котором на каждом промежутке  $t \in [kT_0, (k+1)T_0)$  считаем выполненным неравенство  $|y(t) - c_k| \leq \Delta$ . Пусть  $M$  находится из соотношения

$$(23) \quad \text{Введем величину } \varepsilon \text{ по формуле } \varepsilon = \frac{L_y T_0}{\Delta} \text{ (очевидно, что}$$

$0 < \varepsilon < 1$ ), и запишем нижнюю границу  $R^*$  для  $R$  в виде

$$(25) \quad R^* = \log_2 \left( \frac{2^\nu}{(2^\nu + 1)(1 - \varepsilon)} + 1 \right).$$

Введя величину скорости передачи информации в *битах в секунду*

как  $\bar{R} = \frac{R}{T_0}$  и ее нижнюю допустимую по точности границу  $\bar{R}^*$ ,

из выражения (25) получим, что

$$(26) \quad \bar{R}^* = \frac{L_y}{\varepsilon \Delta} \log_2 \left( \frac{2^\nu}{(2^\nu + 1)(1 - \varepsilon)} + 1 \right).$$

Теперь задача оптимизации кодера сводится к следующей задаче минимизации: определить пару  $(\varepsilon^*, \nu^*)$  из условия

$$(\varepsilon^*, \nu^*) = \arg \min_{\substack{\varepsilon \in (0,1) \\ \nu \in \mathbb{Z}}} \bar{R}(\varepsilon, \nu). \text{ Так как правая часть (26)}$$

строго возрастает по  $\nu$ , то оптимальным значением  $\nu$  будет минимально возможное, а именно  $\nu^* = 0$ . Это означает, что *двоичное* кодирование дает оптимальную (минимальную) скорость передачи данных  $R^* = 1$  бит на шаг, откуда следует, что  $M^* = \delta/2$  является оптимальным значением  $M$  (заметим, что сейчас рассматривается установившийся режим), и что *знаковая* функция является оптимальной функцией преобразования кодера:

$$(27) \quad \bar{y} = \frac{\delta}{2} \text{sign } y.$$

Для оптимального значения  $\nu$  выполнено соотношение  $\bar{R}^* = \frac{L_y}{\Delta} r(\varepsilon)$ , где

$$(28) \quad r(\varepsilon) = \frac{1}{\varepsilon} \log_2 \left( \frac{1}{2(1-\varepsilon)} + 1 \right).$$

Введем величину  $r^* = \min_{0 < \varepsilon < 1} r(\varepsilon)$ . Нетрудно показать, что этот минимум, удовлетворяющий трансцендентному уравнению  $\frac{dr(\varepsilon)}{d\varepsilon} = 0$ , существует. Решая задачу одномерной минимизации численно, получим  $r^* = r(\varepsilon^*) \approx 1,688$ , где  $\varepsilon^* \approx 0,5923$ .

Таким образом, оптимальный интервал квантования по времени  $T_0^*$  определяется выражением

$$(29) \quad T_0^* = \varepsilon^* \frac{\Delta}{L_y}.$$

Так как для бинарного кодирующего устройства скорость передачи информации по каналу связи в битах в секунду

находится из выражения  $\bar{R}^* = \frac{1}{T_0}$ , то, с учетом (29), наименьшая

скорость передачи информации будет

$$(30) \quad \bar{R}^* = r^* \frac{L_y}{\Delta},$$

и эта граница является необходимой для кодеров рассматриваемого класса.

**Замечание о других классах кодеров.** Предельные значения ошибки синхронизации для более сложных схем кодирования будут отличаться от полученных; может быть использован кодер первого порядка с линейной экстраполяцией сигнала или кодер  $n$ -го порядка с прогнозирующей моделью генератора.

В качестве варианта использования усовершенствованных кодеров можно рассмотреть ситуацию, при которой допускается использование на стороне передатчика наблюдателя состояния полного порядка, а также имеется возможность передавать сообщение параллельно по  $n$  каналам или по одному каналу в режиме разделения времени. Тогда через канал связи может быть передан  $n$ -мерный вектор оценок состояния генератора  $\hat{x}(kT_0)$ , который используется кодирующим–декодирующим устройствами для формирования прогноза  $\hat{x}((k+1)T_0)$ . Этот прогноз, в свою очередь, служит для вычисления  $c_{k+1} = C\hat{x}((k+1)T_0)$ . В таком случае ошибка предсказания бинарного кодера определяется скоростью расходимости близлежащих траекторий генератора. Тогда вместо соотношения (20) следует

использовать неравенство  $\frac{\delta}{2} \exp(hT_0) < \Delta$ , где  $h > 0$  –

наибольшая ляпуновская экспонента хаотического генератора.

Это соотношение приводит к неравенству  $T_0 < \frac{\ln(2\|C\|)}{h}$ , которое

следует использовать в таком случае вместо границы (21). Для скорости передачи сообщения тогда получаем вместо нижней

границы  $R^* > \frac{L_y}{\Delta}$  неравенство  $R^* > \frac{h}{\ln(2\|C\|)}$ , вытекающее из

(21). Это значит, что при выполнении условия  $R^* > \frac{h}{\ln(2\|C\|)}$ ,

верхняя граница для ошибки передачи данных  $\Delta$  уменьшается на

каждом интервале квантования  $[kT_0, (k+1)T_0)$  в  $\frac{h}{R^* \ln(2\|C\|)}$  раз

и, следовательно, экспоненциально стремится к нулю.

#### 4. Пример. Адаптивная синхронизация систем Чуа

В данном параграфе приводятся результаты численного исследования предложенного метода синхронизации при ограниченной пропускной способности канала связи на примере адаптивной синхронизации хаотических систем Чуа.

Рассматривается задача синхронизации, в которой как ведущая система (генератор), так и ведомая (приемник) реализованы в виде систем Чуа [1, 3, 15, 22].

**Уравнения ведущей системы.** Ведущая система описывается следующими уравнениями:

$$(31) \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = p(x_2 + x_1 + f(x_1) + \theta f_1(x_1)), \\ \dot{x}_2 = x_1 - x_2 + x_3 \\ \dot{x}_3 = -qx_2, \end{cases}$$

$$y(t) = x_1(t),$$

где  $y(t)$  – выходной сигнал, измеряемый чувствительным элементом;  $x = [x_1, x_2, x_3]^T \in \mathbb{R}^3$  – вектор состояния генератора;  $f(\cdot), f_1(\cdot)$  – кусочно-линейные функции:  $f(z) = m_0 z + 0,5(m_1 - m_0)f_1(z)$ ,  $f_1(z) = |z + 1| - |z - 1|$ ;  $p, q, m_1, m_0$  – известные (на стороне приемника) параметры генератора. Начальное состояние  $x_0 = x(0)$  и параметр  $\theta$  предполагаются априорно неизвестными.

**Уравнения ведомой системы. Алгоритм адаптации.**

Основываясь на результатах раздела 1, построим ведомую систему в виде адаптивного наблюдателя состояния. Тогда уравнения этой системы получаются в виде

$$(32) \quad \begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = p(\hat{x}_2 + \hat{x}_1 + f(\bar{y}(t)) + \hat{\theta}(t)f_1(\bar{y}(t)) + l_1\varepsilon(t), \\ \dot{\hat{x}}_2 = \hat{x}_1 - \hat{x}_2 + \hat{x}_3 + l_2\varepsilon(t), \\ \dot{\hat{x}}_3 = -q\hat{x}_2 + l_3\varepsilon(t), \end{cases}$$

$$\hat{y}(t) = \hat{x}_1(t), \quad \varepsilon(t) = \bar{y}(t) - \hat{y}(t),$$

где  $\hat{x} = [\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{x}_3]^T \in \mathbb{R}^3$  – вектор состояния ведомой системы. Входным сигналом для этой системы является  $\bar{y}(t)$  – выход генератора сигнала, переданный через канал связи. Коэффициенты  $l_1, l_2, l_3$  являются параметрами алгоритма, которые образуют  $(3 \times 1)$ - матрицу обратной связи наблюдателя  $L = [l_1, l_2, l_3]^T$ ;  $\hat{\theta}(t)$  – настраиваемый параметр, который изменяется по алгоритму адаптации, приведенному ниже.

Заметим, что при «идеальном» канале связи, имеющем с неограниченную пропускную способность, вход ведомой системы совпадает с выходом генератора:  $\bar{y}(t) = y(t)$ . В нашем случае сигнал  $\bar{y}$  отличается от  $y(t)$  из-за ограничений на скорость передачи информации.

Алгоритм адаптации (6) в рассматриваемом случае принимает вид

$$(33) \quad \dot{\hat{\theta}} = \gamma(\bar{y}(t) - \hat{y}(t))f_1(\bar{y}(t)) + \alpha(\hat{\theta}_0 - \hat{\theta}(t)),$$

где  $\gamma, \alpha$  – параметры алгоритма;  $\hat{\theta}_0$  – некоторая априорная оценка неизвестного параметра  $\theta$ . Считаем, что  $\hat{\theta}_0$  отличается

от истинного значения  $\theta$  на некоторую (неизвестную) величину  $\Delta\theta = \theta - \hat{\theta}_0$ . Эта ошибка должна устраняться в процессе работы алгоритма адаптации. При реализации алгоритма (33) естественно взять  $\hat{\theta}_0$  в качестве начального значения  $\hat{\theta}$ .

Очевидно, что система (32) имеет форму Лурье, в которой

$$(34) \quad A_L = \begin{bmatrix} -p - l_1 & p & 0 \\ 1 - l_2 & -1 & 1 \\ -l_3 & q & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [1 \quad 0 \quad 0].$$

Матрица коэффициентов передачи наблюдателя  $L$  должна быть выбрана так, чтобы обеспечить пассивность динамической системы  $\dot{x} = A_L x + Bu$ ,  $y = Cx$  с матрицами  $A_L = A - LC$ ,  $B$ ,  $C$  вида (34). Для проверки свойства пассивности, можно использовать технику *линейных матричных неравенств* (ЛМН). Численно также можно исследовать поведение кривой Найквиста – годографа частотной передаточной функции  $W_L(j\omega) = C(j\omega I - A_L)^{-1}B$ . Для рассматриваемой системы, с матрицами  $A_L$ ,  $B$ ,  $C$  вида (34), передаточная функция  $W_L(\lambda)$  имеет вид:

$$(35) \quad W_L(\lambda) = \frac{\lambda^2 + \lambda + q}{A_L(\lambda)},$$

где  $A_L(\lambda) = \lambda^3 + (1 + p + l_1)\lambda^2 + (q + pl_2 + l_1)\lambda + pq + l_3p + l_1q$ .

Для вычисления матрицы  $L$ , используем *метод расположения полюсов* (метод *модального управления*), обеспечивающий совпадение характеристического многочлена  $A_L(\lambda)$  системы (35) с заданным  $\lambda^3 + d_1\lambda^2 + d_2\lambda + d_3$ , который имеет желаемый набор коэффициентов  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$ . Очевидно, что вследствие наблюдаемости пары  $(A, C)$  соответствующая матрица  $L$  всегда найдется, но при этом параметры  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  должны также обеспечивать свойство пассивности системы (35).



## 5. Результаты моделирования

Рассмотрим генератор Чуа (31), имеющий следующие параметры:  $p=10,0$ ,  $q=15,6$ ,  $m_0=0,33$ ,  $m_1=0,22$ .

Для синтеза адаптивного наблюдателя (ведомой системы) (32), используем распределение Баттерворта (*Butterworth*) полюсов линейной части (35). Для системы третьего порядка это распределение дает характеристический многочлен вида  $A_L(s) = s^3 + 2\omega_0 s^2 + 2\omega_0^2 s + \omega_0^3$ , в котором параметр  $\omega_0 > 0$  задает желаемое быстродействие наблюдателя (32). При выборе  $\omega_0$  также следует учесть требование строгой пассивности передаточной функции  $W_L(\lambda)$ . Численные вычисления кривой Найквиста по передаточной функции  $W_L(\lambda)$  при различных значениях  $\omega_0$  показывают, что  $W_L(\lambda)$  пассивна при  $3,6 < \omega_0 < 9,6$ . Для моделирования взято значение параметра  $\omega_0 = 6$ , при котором получаются следующие собственные числа  $\lambda_i$  наблюдателя (32):  $\lambda_1 = -6,0$ ,  $\lambda_{2,3} = -3,0 \pm 5,2j$ , и матрица  $L$  обратной связи равная  $L = [1,00, 5,54, 4,44]^T$ .

Моделирование проводилось при следующих начальных условиях для состояния систем (31) и (32):  $x_0 = [0,3, 0,3, 0,3]^T$  и  $\hat{x}_0 = [0, 0, 0]^T$ , соответственно, и для двух значений параметра  $\theta$  системы (31):  $\theta = 0,8$  и  $\theta = 1,0$ . Параметр  $\hat{\theta}_0$  в алгоритме адаптации (33) взят равным  $\hat{\theta}_0 = 0,9$ . Коэффициенты  $\alpha$ ,  $\gamma$  алгоритма адаптации (33) приняты равными  $\alpha = 0,02$ ,  $\gamma = 0,2$ .

При моделировании получены характеристики процесса адаптивной синхронизации через дискретный канал связи с двоичным кодером (27) (в (13), (14), (16) разрядность  $\nu = 0$ ). Значение  $L_y$  – наибольшей по модулю величины скорости  $\dot{y}(t)$  – взято равным  $L_y = 30 \text{ с}^{-1}$  на основе предварительного анализа хаотического аттрактора системы Чуа (31). Моделирование выполнено для различных значений допустимой  $\Delta$  ошибки передачи сигнала  $y(t)$  по каналу связи. Значение  $M_0$  в (24) взято  $M_0 = 4$  на основе изучения поведения генератора сигнала. Интервал квантования по времени  $T_0$  определялся при заданном  $L_y$  в зависимости от  $\Delta$  из соотношения (29). Скорость передачи

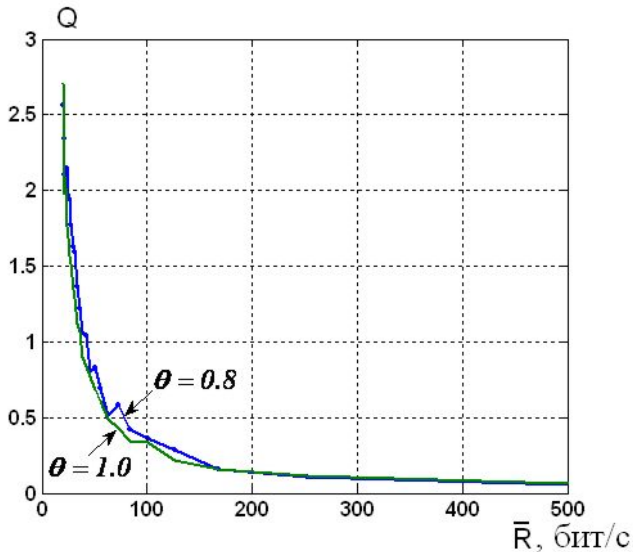


Рис. 1. Зависимости ошибки синхронизации  $Q$  от скорости передачи информации  $\bar{R}$  при  $\theta = 0,8$  и  $\theta = 1,0$ .

информации по каналу связи  $\bar{R}$  в битах в секунду (в бодах) вычислялась через  $T_0$  как  $\bar{R} = T_0^{-1}$ . Параметр  $\rho$  изменения масштаба кодера в уравнении (16) выбран зависящим от  $T_0$ :  $\rho = \exp(-0,1T_0)$ , что соответствует времени установления переходного процесса для  $M_k$  около 30 с.

Моделирование проводилось на интервале длительностью 1500 с в программной среде MATLAB–Simulink методом Рунге–Кутты (4,5)-порядка (процедура ode45) с автоматическим выбором шага.

Результаты численного исследования системы представлены на рис. 1–13. На рис. 1 показана зависимость ошибки синхронизации  $Q$  от скорости передачи информации  $\bar{R}$  для значений  $\theta = 0,8$  и  $\theta = 1,0$ . Как видно из графиков, ошибка синхронизации быстро возрастает, когда скорость передачи данных  $\bar{R}$  становится меньше 100 бод. Зависимости ошибки синхронизации  $Q$  от ошибки передачи информации в канале связи

$\Delta$  и относительной ошибки  $Q/\Delta$  от  $\Delta$  приведены на рис. 2 и рис. 3.

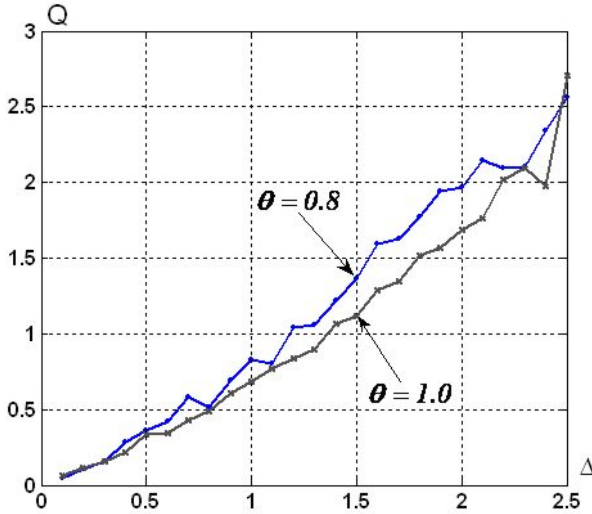


Рис. 2. Зависимости ошибки синхронизации  $Q$  от ошибки передачи информации в канале связи  $\Delta$  при  $\theta = 0,8$  и  $\theta = 1,0$ .

Для оценки качества работы адаптивной системы важна также величина параметрической ошибки. Для рассматриваемого класса систем это ошибка идентификации неизвестного параметра  $\theta$  адаптивным наблюдателем. Охарактеризуем ее в среднеквадратическом смысле, т. е. введем величину

$$Q_{\theta} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T \|\theta - \hat{\theta}(t)\|^2 dt \right)^{1/2},$$

где  $T$  – выбранное время наблюдения за системой (время моделирования). На рис. 4 показаны зависимости относительной

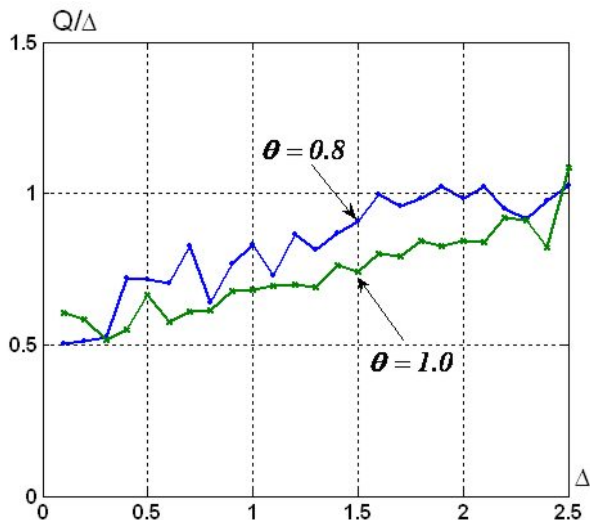


Рис. 3. Зависимости относительной ошибки  $Q/\Delta$  от ошибки передачи информации в канале связи  $\Delta$  при  $\theta = 0,8$  и  $\theta = 1,0$ .

параметрической ошибки  $Q_\theta/\theta$  от скорости передаваемой по каналу связи информации. Принято  $T = 1500$  с. Как видно из рис. 4, для рассматриваемой системы начиная со значений  $\bar{R} \geq 200$  ошибка идентификации параметра  $\theta$  практически не меняется. Это связано с тем, что регуляризованный алгоритм адаптации (алгоритм (6) при  $\alpha \neq 0$ ) не обеспечивает сходимости к нулю ошибки идентификации  $\|\theta - \hat{\theta}(t)\|$ . Таким образом, с точки зрения адаптивной идентификации имеются «разумные» ограничения на объем передаваемых по каналу связи данных. Вместе с тем, из графиков видно, что ошибка идентификации для данного примера составляет  $3 \div 5$  %, что является вполне приемлемым для многих технических приложений.

На рис. 5–7 показаны типичные графики процессов  $y(t)$ ,

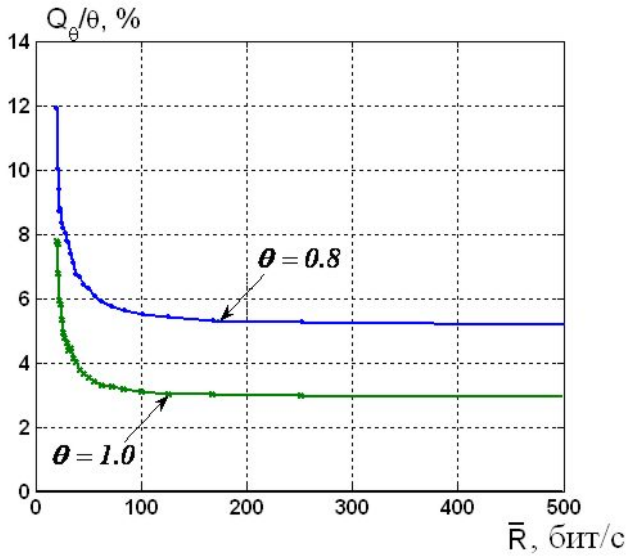


Рис. 4. Зависимости относительной параметрической ошибки  $Q_\theta/\theta$  от  $\bar{R}$ .

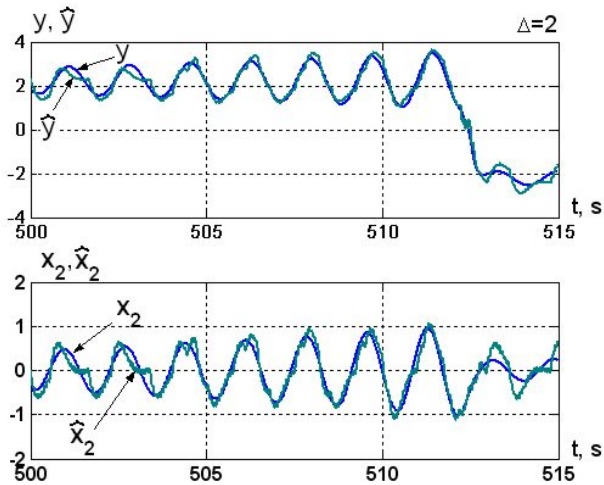


Рис. 5. Графики процессов в системах (31) и (32), (33) при  $\Delta = 2$ ,  $\bar{R} = 25$  бод.

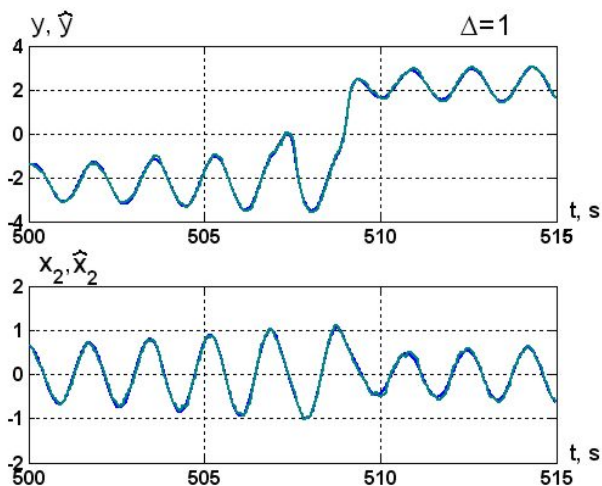


Рис. 6. Графики процессов в системах (31) и (32), (33) при  $\Delta = 1, \bar{R} = 50$  бод.

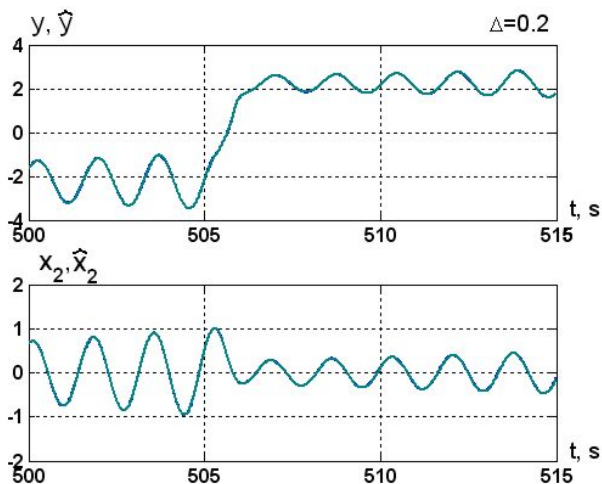


Рис. 7. Графики процессов в системах (31) и (32), (33) при  $\Delta = 0,2, \bar{R} = 250$  бод.

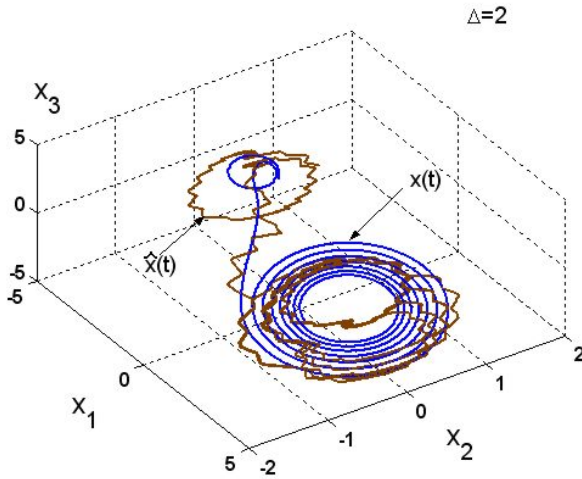


Рис. 8. Фазовые траектории генератора (31) и ведомой системы (32),  $t \in [500, 510]$ ,  $\theta = 0,8$ ,  $\Delta = 2$ .

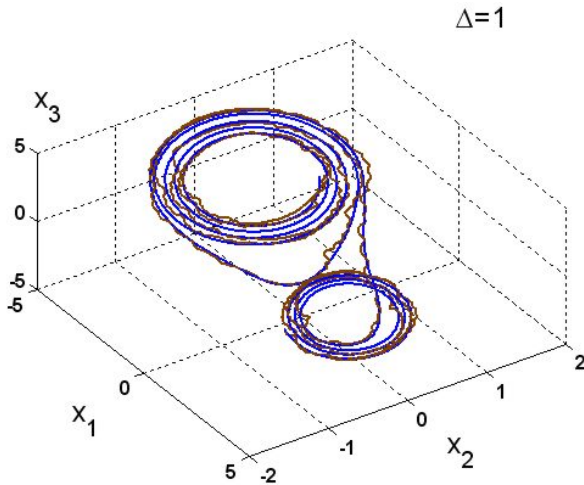


Рис. 9. Фазовые траектории генератора (31) и ведомой системы (32),  $t \in [500, 510]$ ,  $\theta = 0,8$ ,  $\Delta = 1$ .

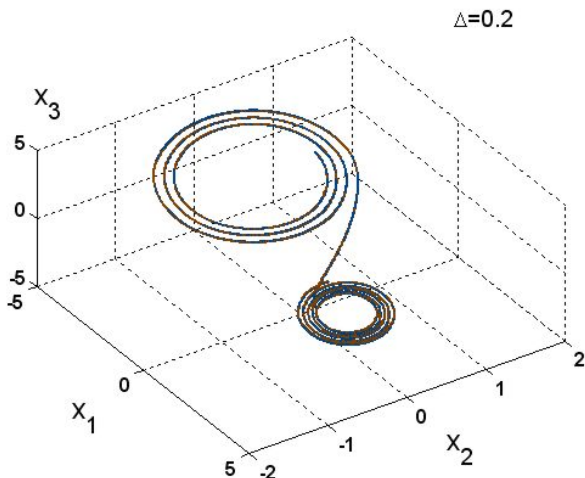


Рис. 10. Фазовые траектории генератора (31) и ведомой системы (32),  $t \in [500, 510]$ ,  $\theta = 0,8$ ,  $\Delta = 0,2$ .

$\hat{y}(t)$ ,  $x_2(t)$ ,  $\hat{x}_2(t)$  в системах (31) и (32), (33) при достаточно больших  $t$  (по окончании процесса адаптивной идентификации параметра  $\theta$ ). Принято значение параметра  $\theta = 0,8$ . Выбраны значения  $\Delta = 0,2; 1,0; 2,0$ , которым, согласно (24), (29), соответствуют  $M_\infty = 0,1; 0,5; 1,0$ , период дискретности  $T_0 = 0,004$  с;  $0,02$  с;  $0,04$  с, число переданных бит в секунду  $\bar{R} = 250; 50; 25$  бод. Соответствующие фазовые траектории в пространстве состояний генератора (31), совмещенном с пространством состояний ведомой системы (32), показаны на рис. 8–10.

Процесс адаптивной идентификации параметра  $\theta$  ведущей системы при его изменении иллюстрируется рис. 11–13. При моделировании параметр  $\theta = \theta(t)$  взят в форме «прямоугольной волны» с периодом  $100$  с и амплитудой, равной  $0,1$  относительно смещения  $\theta_0 = 0,9$ . Остальные условия моделирования



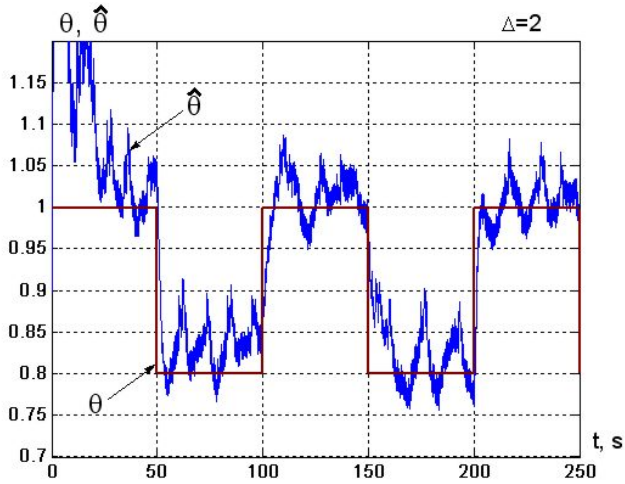


Рис. 11. Идентификация параметра  $\theta(t)$ ,  $\Delta = 2$ ,  $\bar{R} = 25$  бод.

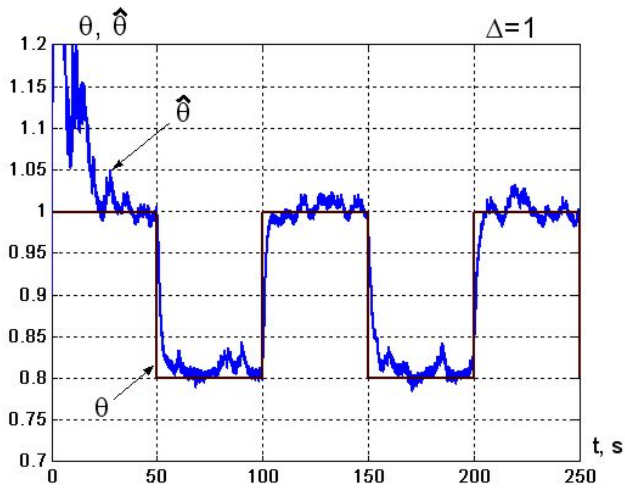


Рис. 12. Идентификация параметра  $\theta(t)$ ,  $\Delta = 1$ ,  $\bar{R} = 50$  бод.

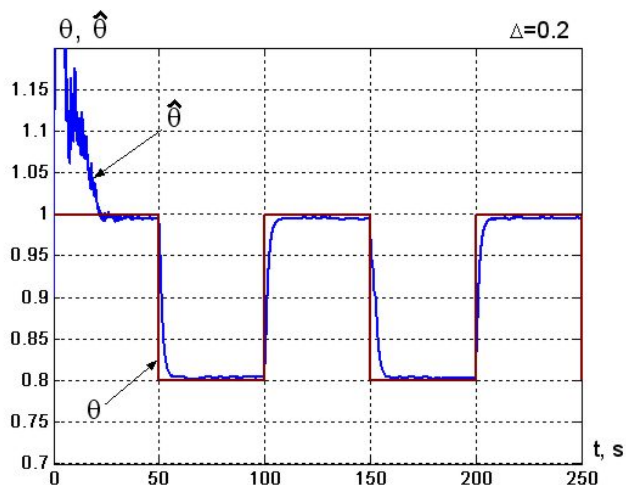


Рис. 13. Идентификация параметра  $\theta(t)$ ,  $\Delta = 0,2$ ,  $\bar{R} = 250$  бод.

взяты прежними. Как видно из полученных графиков, время переходного процесса (время идентификации) параметра  $\theta$  составляет менее 10 с, т. е. процесс адаптивной идентификации происходит в течение нескольких «характерных периодов» колебаний хаотического генератора (который можно оценить из рис. 5). Заметим также, что при малой скорости передачи информации по каналу ( $\bar{R} = 25$  бод) можно только распознать, какое из двух значений параметра  $\theta \in \{0,8, 1,0\}$  реализуется, в то время как при  $\bar{R} = 200$  бод и выше точность идентификации оказывается достаточно высокой.

## 6. Заключение

В данной работе рассмотрена новая задача синхронизации хаотических систем на основе адаптивных наблюдателей при ограниченной пропускной способности канала связи между ведущей и ведомой системами. Новизна изложенных в работе результатов по сравнению с имеющимися публикациями по управлению при информационных ограничениях вытекает из

того, что:

1. Рассматривается задача синхронизации процессов, а не стабилизации.

2. Предельным множеством в пространстве состояний замкнутой системы является аттрактор, а не точка.

3. Исследуется глобальное, а не локальное поведение системы.

4. Через канал связи передается скалярный выход объекта, а не весь вектор состояния.

5. Исследуется система с кодером с памятью «единица» (а не с кодером полного порядка или кодером с бесконечной памятью).

6. Рассматривается случай нелинейной системы с параметрической неопределенностью.

Для перечисленных выше задач к настоящему времени не получено результатов по определению необходимых границ для скорости передачи информации. Нет также оснований предполагать возможности получения нулевой ошибки синхронизации. Моделированием выполнено численное исследование адаптивной синхронизации систем Чуа при параметрической неопределенности. Результаты моделирования позволяют получить количественные характеристики процессов в рассматриваемой гибридной системе.

### **Литература**

1. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р., ФРАДКОВ А. Л. *Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке MATLAB*. – СПб.: Наука, 1999. – 467 с.
2. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р. ФРАДКОВ А. Л. *Элементы математического моделирования в программных средах MATLAB 5 и Scilab (учебное пособие)*. – СПб.: Наука, 2001. – 286 с.
3. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р., ФРАДКОВ А. Л. *Управление хаосом: Методы и приложения. Часть I: Методы* // Автоматика и телемеханика. – 2003. – Том 64, №5 – С. 3–45.

4. АНДРИЕВСКИЙ Б. Р., ФРАДКОВ А. Л. *Метод пассивации в задачах адаптивного управления, оценивания и синхронизации* // Автоматика и телемеханика. – 2006. – №11 – С. 33-37.
5. УПРАВЛЕНИЕ МЕХАТРОННЫМИ ВИБРАЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ / Б.Р. Андриевский, И.И. Блехман, Ю.А. Борцов и др. / Под ред. И.И. Блехмана и А.Л. Фрадкова. - Санкт-Петербург: Наука, 2001. - 278 с.
6. ФРАДКОВ А. Л. *Синтез адаптивной системы стабилизации линейного динамического объекта* // Автоматика и телемеханика. – 1974. – Том 35, №12 – С. 96–103.
7. ФРАДКОВ А. Л. *Схема скоростного градиента и ее применения в задачах адаптивного управления* // Автоматика и телемеханика. – 1979. – Том 9. – С. 90–101.
8. ФРАДКОВ А. Л., АНДРИЕВСКИЙ Б. Р. *Адаптивная синхронизация нелинейных систем* // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Том 50, №10 – С. 17–23.
9. ФРАДКОВ А. Л., АНДРИЕВСКИЙ Б. Р. *Метод пассивации в задачах адаптивного управления, наблюдения и синхронизации* /Нелинейные системы. Частотные и матричные неравенства. Под ред. А.Х. Гелига, Г. А. Леонова, А. Л. Фрадкова. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – С. 52-499.
10. ХРЯЩЕВ С. М. *Оценка времени управления хаотических систем: Часть I* // Автоматика и телемеханика. – 2004. – Том 64, №10 – С. 1566–1579.
11. ХРЯЩЕВ С. М. *Оценка времени управления хаотических систем: Часть II* // Автоматика и телемеханика. – 2004. – Том 64, № 11 – С. 1782–1792.
12. ANDRIEVSKY B. *Adaptive synchronization methods for signal transmission on chaotic carriers* // Mathematics and Computers in Simulation. – 2002. – Vol. 58, №4-6. – P. 285–293.
13. BLEKHMAN I.I., FRADKOV A.L. , TOMCHINA O.P., BOGDANOV D.E. *Self-synchronization and controlled syn-*

- chronization: General definition and example design* // Mathematics and Computers in Simulation. – 2002. – Vol. 58, №4-6. – P. 367–384.
14. BROCKETT R., LIBERZON D. *Quantized feedback stabilization of linear systems* // IEEE Trans. Automat. Contr.. – 2000. – Vol. 45. – P. 1279–1289.
  15. DEDIEU H., KENNEDY M., HASLER M. *Chaos shift keying: modulation and demodulation of chaotic carrier using self-synchronized Chua's circuits* // IEEE Trans. Circ. Syst. II: Analog, Digital Signal Proc. – 1993. – Vol. 40, №10. – P. 634–642.
  16. EFIMOV D., FRADKOV A. L. *Adaptive tuning to bifurcation for time-varying nonlinear systems* // Automatica. – 2006. – Vol. 42, №3. – P. 417–425.
  17. FRADKOV A. L., ANDRIEVSKY B., EVANS R. J. *Chaotic observer-based synchronization under information constraints* // e-print ArXiv. – URL: [www.arxiv.org](http://www.arxiv.org). – 2005. – Vol. nlin.CD/0511010.
  18. FRADKOV A. L., ANDRIEVSKY B., EVANS R. J. *Adaptive observer-based synchronization of chaotic systems with first-order coder in presence of information constraints* // IEEE Trans. Circuits Syst. I. – 2008. – Vol. 55, №6. – P. 1685–1694.
  19. FRADKOV A. L., EVANS R. J. *Control of chaos: Methods, applications in engineering* // Annual Reviews in Control. – 2005. – Vol. 29, №1. – P. 33–56.
  20. FRADKOV A. L., KHRYASCHEV S. M. *How much control needs control of chaos* / Proc. 5th EUROMECH Nonlinear Dynamics Conference (ENOC 2005). – 2005. – P. 1295–1302.
  21. FRADKOV A., MARKOV A. *Adaptive synchronization of chaotic systems based on speed gradient method, passification* // IEEE Trans. Circ. Syst, Part I. – 1997. – Vol. 10. – P. 905–912.
  22. FRADKOV A., NIJMEIJER H., MARKOV A. *Adaptive observer-based synchronization for communication* // Int. J. Bifurcations Chaos. – 2000. – Vol. 10, №12. – P. 2807–2813.

23. FRADKOV A., POGROMSKY A. *Introduction to control of oscillations and chaos*. – Singapore: World Scientific Publishers, 1998.
24. LIBERZON D. *Hybrid feedback stabilization of systems with quantized signals* // Automatica. – 2003. – Vol. 39. – P. 1543–1554.
25. LIBERZON D., HESPANHA J. *Stabilization of nonlinear systems with limited information feedback* // IEEE Trans. Autom. Control. – 2005. – Vol. 50, №6. – P. 910–915.
26. MATVEEV A., SAVKIN A. *An analogue of Shannon information theory for networked control systems: State estimation via a noisy discrete channel* / Proc. 43rd IEEE Conf. Dec. Control (CDC'04). IEEE Press, Piscataway, NJ. – 2004. – Vol. 4. – P. 4485–4490.
27. NAIR G., EVANS R., MAREELS I., MORAN W. *Topological feedback entropy, nonlinear stabilization* // IEEE Trans. Autom. Control. – 2004. – Vol. 49, №9. – P. 1585–1597.
28. NAIR G., EVANS R. *Exponential stabilisability of finite-dimensional linear systems with limited data rates* // Automatica. – 2003. – Vol. 39. – P. 585–593.
29. NAIR G., EVANS R. *Stabilizability of stochastic linear systems with finite feedback data rates* // SIAM J. Control Optim.. – 2004. – Vol. 43, №2. – P. 413–436.
30. TATIKONDA S., MITTER S. *Control under communication constraints* // IEEE Trans. Automat. Contr.. – 2004. – Vol. 49, №7. – P. 1056–1068.
31. WONG W., BROCKETT R. *Systems with finite communication bandwidth constraints – Part I: State estimation problems* // IEEE Trans. Automat. Control. – 1997. – Vol. 42, №9. – P. 1294–1299.
32. WONG W., BROCKETT R. *Systems with finite communication bandwidth constraints – Part II: Stabilization with limited information feedback* // IEEE Trans. Automat. Control. – 1999. – Vol. 44, №5. – P. 1049–1053.

## **ADAPTIVE SYNCHRONIZATION FOR A CLASS OF NONLINEAR SYSTEMS UNDER DATA RATE LIMITATIONS OF THE COMMUNICATION CHANNEL**

**Boris Andrievsky**, Dr.Sc., Leading Research Fellow  
(bandri@yandex.ru).

**Alexander L. Fradkov**, Dr.Sc., Head of the Lab (Institute for  
Problems of Mechanical Engineering of RAS, Saint Petersburg, 61,  
V.O. Bolshoy Av., (812) 321-47-66, fradkov@mail.ru)

*Abstract: Adaptive synchronization method for a class of nonlinear Lur'e systems having passifiable linear part under the limited-band communication channel and a first-order coder is proposed. An application of the proposed method by the example of adaptive synchronization of chaotic Chua systems is presented. Quantitative measures of synchronization process for different data rates of the channel are obtained. Availability of the proposed method for information transmission based on chaotic signal modulation is demonstrated.*

**Keywords:** adaptive synchronization, nonlinear systems, communication channel, information constraints.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии П.С. Щербаковым.*

УДК 519.1  
ББК 32.81

## **МЕХАНИЗМЫ СТИМУЛИРОВАНИЯ СОКРАЩЕНИЯ СРОКОВ РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ ПРИ ЛИНЕЙНЫХ ФУНКЦИЯХ ЗАТРАТ**

**Бурков В. Н.<sup>1</sup>, Цветков А. В.<sup>2</sup>**

*(Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем управления РАН, Москва)*

**Сычев А. П.<sup>3</sup>**

*(ЦНИИ Транспортного строительства)*

*Даны постановки задач стимулирования сокращения сроков реализации проектов. Решена задача разработки унифицированной линейной системы стимулирования сокращения сроков реализации проекта. Для решения задачи введены понятия пропускной способности пути и мощности разреза и доказана теорема двойственности о равенстве максимальной пропускной способности путей и минимальной мощности разрезов.*

Ключевые слова: механизм стимулирования, реализация проекта, функция затрат.

### **1. Введение**

Система стимулирования определяет зависимость вознаграждения исполнителя (агента), получаемого им от центра, от выбираемых действий. Исследование моделей стимулирования

---

<sup>1</sup> Владимир Николаевич Бурков, доктор технических наук, профессор (vlab17@bk.ru).

<sup>2</sup> Александр Васильевич Цветков, доктор технических наук, профессор (olvinogr@ipu.ru).

<sup>3</sup> Анатолий Петрович Сычев, кандидат технических наук, генеральный директор ЦНИИТС (mail@tsniis.com)



в рамках теории управления началось практически одновременно и независимо примерно в конце 60-х годов прошлого века.

Основными научными школами по этому направлению являются теория активных систем (научный центр – Институт проблем управления РАН) [2], теория иерархических игр (научный центр – Вычислительный центр РАН) [3] и теория контрактов, развиваемая в основном зарубежными учеными [4]. В настоящее время в рамках теории активных систем разработаны базовые механизмы стимулирования: компенсаторные (*К*-типа), скачкообразные (*С*-типа), линейные (*Л*-типа), основанные на перераспределении дохода (*Д*-типа) [5]. Различают два вида систем стимулирования – персонифицированные (индивидуальные) и унифицированные. В унифицированных системах зависимость вознаграждения от тех или иных параметров одинакова для всех агентов. На основе базовых систем стимулирования можно строить более сложные системы [5]. Особенностью систем стимулирования в управлении проектами является технологическая зависимость между работами проекта, определяемая сетевым графиком. В работе рассматривается задача построения оптимальной линейной унифицированной системы стимулирования сокращения продолжительности проекта.

## 2. Постановка задачи

Задан проект из  $n$  операций (работ), зависимости между которыми определяются сетевым графиком. Для каждой операции  $(i, j)$  определена зависимость

$$(1) Z_{ij} = K_{ij}\tau_{ij}, 0 \leq \tau_{ij} \leq \Delta_{ij}$$

затрат  $Z_{ij}$ , требуемых на сокращение продолжительности операции на время  $\tau_{ij}$ . Унифицированная линейная система стимулирования определяется функцией стимулирования

$$(2) S_{ij}(\tau_{ij}) = \lambda\tau_{ij},$$

определяющей вознаграждение исполнителям операции  $(i, j)$  при сокращении ее продолжительности на время  $\tau_{ij}$ . Коэффициент  $k_{ij}$  определяет затраты исполнителей на сокращение про-

должительности операции на единицу, а параметр  $\lambda$  равен ставке оплаты исполнителей за каждую единицу сокращения продолжительности операции.

Очевидно, что исполнители согласны на сокращение продолжительности операции на время  $\tau_{ij} > 0$ , если

$$(3) \quad \lambda \geq K_{ij}.$$

Суммарные выплаты вознаграждения равны

$$(4) \quad S(\lambda, \tau) = \sum_{(i,j)} \lambda \tau_{ij} = \lambda \sum_{(i,j)} \tau_{ij}$$

**Задача.** Определить  $\lambda$  и  $\{\tau_{ij}\}$ , такие что продолжительность проекта уменьшилась на величину  $\Delta > 0$ , а суммарное вознаграждение (премия) (4) минимально.

Для решения поставленной задачи сначала рассмотрим вспомогательную задачу.

### 3. Задача о разрезе минимальной мощности

Рассмотрим  $(n + 1)$ -вершинную сеть с входом 0 и выходом  $n$ . Обозначим через  $K_{ij} > 0$  пропускную способность дуги  $(i, j) \in U$  ( $U$  – множество дуг сети). Обозначим через  $\mu$  путь в сети, соединяющей вход 0 с выходом  $n$ .

*Определение 1.* Пропускной способностью пути  $\mu$  называется минимальная из пропускных способностей дуг пути

$$C(\mu) = \min_{(i,j) \in \mu} K_{ij}.$$

*Определение 2.* Мощностью разреза  $q(V)$  называется максимальная пропускная способность дуг, заходящих в разрез

$$q(V) = \max_{(i,j) \in W(V)} K_{ij},$$

где  $W(V)$  – множество дуг заходящих в разрез (напомним, что разрезом называется множество вершин сети, содержащее выход и не содержащее вход [1]).

Заметим, что пропускная способность любого пути не превышает мощности любого разреза. Действительно, для любого пути  $\mu$  и любого разреза  $V$  найдется дуга  $(i, j) \in \mu$  и заходящая в разрез  $V$ . Имеем

$$C(\mu) \leq K_{ij} \leq q(V).$$

Поэтому, если найдется путь  $\mu$  и разрез  $V$ , такие что

$$C(\mu) = q(V),$$

то путь  $\mu$  имеет максимальную пропускную способность, а разрез  $V$  имеет минимальную мощность.

**Задача 1.** Определить разрез минимальной мощности.

**Теорема 1 (двойственности).** Минимальная мощность разрезов равна максимальной пропускной способности путей.

*Доказательство.* Как и при доказательстве теоремы Форда-Фалкерсона [5], доказательство проведем конструктивно. Пометим вершину 0 индексом 0, а остальные вершины индексом  $\lambda_i = M$ , где  $M$  – большое положительное число ( $M > \max_{(ij)} K_{ij}$ ).

*k-ый шаг.* Рассматриваем все дуги сети. Для каждой вершины  $j$  проверяем условие

$$\lambda_j \leq \max_{i \in U_j} \min(\lambda_i, K_{ij}),$$

где  $U_j$  – множество дуг, заходящих в вершину  $j$ .

Если это условие нарушено, то заменяем индекс  $\lambda_j$  на меньший

$$\lambda'_j = \max_{i \in U_j} \min(\lambda_i, K_{ij}).$$

В противном случае оставляем индекс  $\lambda_j$  без изменений. За конечное число шагов индексы установятся. Действительно, последовательность индексов является невозрастающей, причем на каждой итерации, если происходит уменьшение, то на конечную величину.

Докажем, что установившиеся индексы  $\lambda_i$  равны максимальной пропускной способности путей из входа в вершину  $i$ . Это справедливо для  $n = 1$ . Пусть это справедливо для сети из  $n$  вершин. Докажем, что тогда это справедливо и для  $(n + 1)$  вершин. Покажем, что

$$(5) \quad \lambda_n = \max_{i \in U_n} \min(\lambda_i, K_{in})$$

является максимальной пропускной способностью путей сети. Заметим, что  $\min(\lambda_i, K_{in})$  определяет максимальную

пропускную способность всех путей, содержащих дугу  $(i, n)$ . Следовательно (5) определяет максимальную пропускную способность путей в сети.

Для определения разреза минимальной мощности удалим из сети все дуги, такие что  $K_{ij} \leq \lambda_n$ . Пометим вершину 0 индексом (+). Пусть  $Q$  – множество помеченных вершин. Помечаем индексом (+) вершину  $j$ , если  $(i, j) \in U$  и  $i \in Q$ , а  $j \notin Q$ . Покажем, что множество непомеченных вершин является разрезом  $V$  сети мощность которого равна  $\lambda_n$ . Во-первых, это разрез сети, поскольку выход  $n \in V$ , а вход  $0 \notin V$ . Далее для всех дуг, входящих в разрез, имеет место неравенство  $K_{ij} \leq \lambda_n$  (в противном случае вершина  $j$  была бы помечена), причем существует хотя бы одна дуга  $(i, j) \in V$  такая, что  $K_{ij} = \lambda_n$ . Теорема доказана.

**Пример 1.** Рассмотрим сеть на рис. 1.

1 шаг. Индексы вершин  $\lambda_1 = 5, \lambda_2 = 3, \lambda_3 = 1, \lambda_4 = 3, \lambda_5 = 3$ .

2 шаг.  $\lambda_1 = 5, \lambda_2 = 3, \lambda_3 = 1, \lambda_4 = 3, \lambda_5 = 3$ ; индексы установились. Поэтому  $\max_{\mu} C(\mu) = 3$ .

Для определения пути с максимальной пропускной способностью удаляем из сети все дуги с  $K_{ij} < \lambda_n$ . Все оставшиеся пути имеют пропускную способность, равную  $\lambda_n$  (рис. 2).

Для определения разреза минимальной мощности помечаем вершины 0, 1. Множество вершин 2, 3, 4, 5 образует разрез сети, а множество дуг  $(0, 2), (0, 3), (0, 4), (1, 2), (1, 5)$  – это множество дуг, входящих в разрез. Мощность разреза, очевидно, равна 3.

Если сеть не имеет контуров и вершины имеют правильную нумерацию, то алгоритм существенно упрощается:

1 шаг. Определяем  $\lambda_1 = K_{01}$ .

$k$ -ый шаг. Определяем  $\lambda_k = \max_{i < k} \min(\lambda_i, K_{ik})$ .

$n$ -ый шаг. Определяем  $\lambda_n = \max_{i < n} \min(\lambda_i, K_{in})$ .

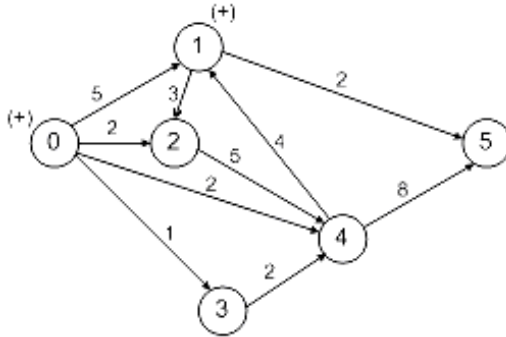


Рис. 1. Сеть для примера 1

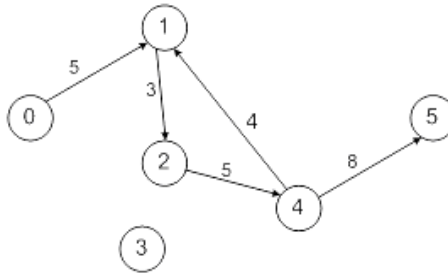


Рис. 2. Сеть без дуг с  $k_{ij} < \lambda_n$

#### 4. Синтез оптимальной унифицированной системы

Перейдем к описанию алгоритма синтеза оптимальной унифицированной линейной системы стимулирования. Обозначим  $D_{ij}$  – нормативные продолжительности операций,  $d_{ij}$  – минимальные продолжительности операций ( $\Delta_{ij} = D_{ij} - d_{ij}$ ).

1 шаг. Полагаем продолжительности всех операций равными  $D_{ij}$ .

2 шаг. Определяем сеть критических путей.

3 шаг. Для сети критических путей решаем задачу определения разреза минимальной мощности  $q_1$ .

Полагаем  $\lambda_1 = q_1$ , фиксируем продолжительности на уровне  $D_{ij}$  для всех операций таких, что  $K_{ij} > q_1$ , а также для тех, у которых  $d_{ij} = D_{ij}$ , и определяем разрез сети  $V_1$  с минимальным числом дуг. Дело в том, что при заданном  $\lambda$  задача минимизации фонда стимулирования сводится к задаче минимизации суммарного сокращения продолжительностей операций. Пусть число дуг разреза равно  $m_1$ . В этом случае сокращение продолжительности проекта на 1 требует величины фонда стимулирования  $q_1 m_1$ .

Увеличим  $q$  до  $q_2$ , при котором число критических операций таких, что  $K_{ij} \leq q_2$ , увеличивается, и снова определяем разрез с минимальным числом заходящих дуг  $m_2$ .

Если,  $q_2 m_2 < q_1 m_1$ , то очевидно, что норматив  $q_2$  выгоднее, чем  $q_1$ , хотя  $q_2 > q_1$ . Продолжаем увеличивать  $q$  до тех пор, пока на некотором шаге  $S$  не получим  $q_S = \max_{(i,j) \in M} K_{ij}$ , где  $M$  – множество критических операций. Определяем  $\tau$ , такое что  $q_\tau m_\tau = \min_j q_j m_j$ .

Сокращаем продолжительности дуг, заходящих в разрез  $V_\tau$ , до тех пор, пока в сети не появится новый критический путь либо пока продолжительность хотя бы одной дуги, заходящей в разрез, не будет равна минимальной. Далее возвращаемся к шагу 2. Алгоритм заканчивается, когда в сети появляется хотя бы один критический путь, у которого продолжительности всех работ равны минимальным.

**Пример 2.** Рассмотрим сеть на рис. 3 с данными таблицы 1.

*Итерация 1.* На рис. 4. приведена сеть, состоящая из критических операций.

Числа у дуг в скобках равны пропускным способностям  $K_{ij}$ . Числа в квадратных скобках у вершин равны максимальным пропускным способностям путей из входа в соответствующую вершину. Минимальная мощность разрезов равна 3, полагаем  $q_1 = 3$ .

Для определения разреза с минимальным числом заходящих дуг таких, что  $K_{ij} \leq q_1$ , полагаем пропускные способности дуг с  $K_{ij} \leq q_1$  равными 1, а пропускные способности дуг с

$K_{ij} > q_1$  – равными  $M$  ( $M$  – большое число), и определяем максимальный поток и минимальный разрез в полученной сети. В данном случае решение очевидно. В минимальный разрез  $v_1$  заходят дуги (1, 3) (1, 4), число которых равно  $m_1 = 2$ .

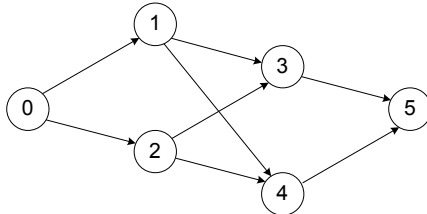


Рис. 3. Сеть для примера 2

Таблица 1. Данные о параметрах  $d_{ij}$ ,  $D_{ij}$  и  $K_{ij}$ .

$(i, j)$	(0, 1)	(0, 2)	(1, 3)	(1, 4)	(2, 3)	(2, 4)	(3, 5)	(4, 5)
$d_{ij}$	2	1	4	1	2	3	2	4
$D_{ij}$	6	3	7	5	3	7	5	7
$K_{ij}$	5	2	3	1	3	2	6	7

Берем следующее значение  $q_2 = 5$ . Теперь в минимальный разрез заходит всего одна дуга (0, 1), то есть  $m_2 = 1$ . Так как  $q_1 m_1 = 6 > q_2 m_2 = 5$ , то сокращаем продолжительность операции (0, 1) на  $\Delta = 1$ . Больше нельзя, так как при  $\Delta = 1$  в сети появляется новый критический путь (0, 2, 4, 5). Продолжительность проекта равна 17, фонд стимулирования равен 5.

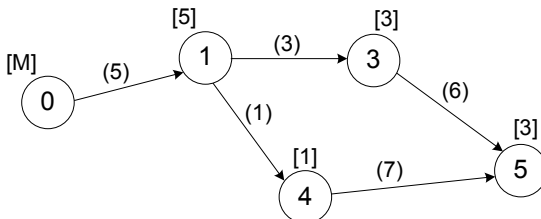


Рис.4. Сеть критических операций на шаге 1

*Итерация 2.* Сеть критических операций приведена на рис. 5.

Минимальная мощность разреза равна 3. Множество дуг, заходящих в разрез:  $(0, 2)$ ;  $(1, 3)$ ;  $(1, 4)$ . Берем  $q_1 = 3$  и определяем разрез с минимальным числом дуг. В этот разрез заходят дуги  $(0, 2)$ ;  $(1, 3)$ ;  $(1, 4)$ , т. е.  $m_1 = 3$ . Следующее значение  $q_2 = 5$ . Минимальное число дуг, заходящих в разрез, равно  $m_2 = 2$ . Дальнейшее увеличение  $q$  нецелесообразно, так как нет ни одного разреза с числом заходящих дуг меньше 2. Так как  $q_1 m_1 = 9 < q_2 m_2 = 10$ , то сокращаем продолжительности дуг  $(0, 2)$ ;  $(1, 3)$ ;  $(1, 4)$  на  $\Delta = 2$ . Больше нельзя, так как при  $\Delta = 2$  продолжительность операции  $(0, 2)$  равна минимальной. Продолжительность проекта равна  $T = 15$ , фонд стимулирования увеличился на  $\Delta\Phi = 18$ .

*Итерация 3.* Сеть критических операций приведена на рис. 6.

Минимальная мощность разрезов по-прежнему равна 3. Берем  $q_1 = 3$  и определяем разрез с минимальным числом заходящих дуг. Это дуги  $(1, 3)$ ;  $(1, 4)$ ;  $(2, 4)$ ,  $m_1 = 3$ . Увеличение  $q$  до  $q_2 = 5$  не дает выигрыша, как в предыдущем случае. Сокращаем продолжительности операций на  $\Delta = 1$ . Больше нельзя, поскольку при  $\Delta = 1$  продолжительность операции  $(1, 3)$  равна минимальной. Продолжительность проекта равна 14, фонд стимулирования увеличился на  $\Delta\Phi = 9$ .

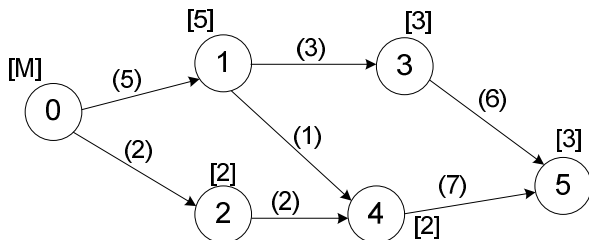


Рис. 5. Сеть критических операций на шаге 2



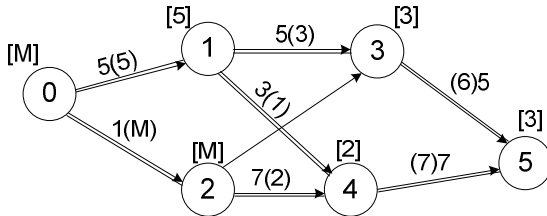


Рис. 6. Сеть критических операций на шаге 3

*Итерация 4.* Сеть критических путей не изменилась. Полагаем  $K_{13} = M$  и определяем минимальную мощность разрезов. В данном случае она равна 5. Полагаем  $q_1 = 5$ . Минимальное число заходящих дуг равно  $m_1 = 2$ . Это дуги (0, 1) и (2, 4). Сокращаем продолжительности операций (0, 1) и (2, 4) на  $\Delta = 3$ . Больше нельзя, так как их продолжительности становятся равными минимальным. Продолжительность проекта равна  $T = 11$ , фонд стимулирования увеличился на  $\Delta\Phi = 30$ .

*Итерация 5.* Сеть критических путей не изменилась, однако  $K_{01} = K_{24} = M$  (рис. 7).

Минимальная мощность разрезов равна 7. Берем  $q_1 = 7$ . В разрез с минимальным числом заходящих дуг заходят дуги (3, 5) и (4, 5). Сокращаем их продолжительности на  $\Delta = 3$ . Продолжительность проекта равна 8, фонд стимулирования увеличился на  $\Delta\Phi = 42$ .

Алгоритм окончен, так как в сети появились два критических пути, продолжительности операций которых равны минимальным.

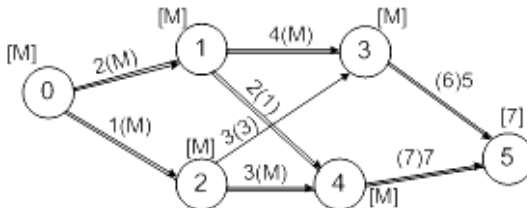


Рис. 7. Сеть критических операций на шаге 4

## **Заключение**

Рассмотренный подход к разработке унифицированных линейных механизмов сокращения сроков реализации проекта можно обобщать в различных направлениях. Во-первых, можно рассмотреть унифицированные скачкообразные системы стимулирования сроков сокращения проектов. Во-вторых, обобщить метод решения на случай нелинейных (кусочно-линейных) функций затрат. Наконец, представляют интерес групповые системы стимулирования, в которых исполнители разбиты на группы, так что для каждой группы применяется своя унифицированная система стимулирования. Эти и другие задачи, связанные с разработкой механизмов стимулирования в управлении проектами, требуют дальнейших исследований.

## **Литература**

1. БУРКОВ В. Н., ЗАЛОЖНЕВ А. Ю., НОВИКОВ Д. А. *Теория графов в управлении организационными системами*. – М.: СИНТЕГ, 2001. – 124 с.
2. БУРКОВ В. Н., НОВИКОВ Д. А. *Теория активных систем: состояние и перспективы*. – М.: СИНТЕГ, 1999. – 128 с.
3. ГЕРМЕЙЕР Ю. Б. *Игры с противоположными интересами*. – М.: Наука, 1976. – 327 с.
4. МУЛЕН Э. *Кооперативное принятие решений: аксиомы и модели*. – М.: Мир, 1991. – 464 с.
5. НОВИКОВ Д. А. *Теория управления организационными системами*. – М.: Московский психолого-социальный институт, 2005. – 584 с.

## **INSENTIVE MECHANISMS TO REDUCE PROJECTS EXECUTION TIME UNDER LINEAR EXPENSE FUNCTIONS**

**Vladimir Burkov**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand.Sc., Doctor of Science, professor (vlab17@bk.ru).

**Alexandr Tsvetkov**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Doctor of Science, professor (olvinogr@ipu.ru).

**Anatoly Sychev**, Research Institute of Transport Construction, Moscow, General Director (mail@tsniis.com).

*Abstract: Incentive problems to reduce projects execution time are put. The optimal unified linear incentive scheme is found that reduces project execution time. The solution is based on the notions of network path capacity and the power of a cutset. A sort of duality theorem is proven to establish the equality of the maximum ways capacity and the minimum power of cutsets.*

Keywords: incentive mechanism, project execution, expense function.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Д.А. Новиковым.*

УДК 004.9:504.056:656[470.319]

ББК 20.18:39.3/.9

## **ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ ПРОМЫШЛЕННО-ТРАНСПОРТНОГО КОМПЛЕКСА**

**Иващук О. А.<sup>1</sup>**

*(Орловский государственный аграрный университет, Орел)*

**Константинов И. С.<sup>2</sup>**

*(Орловский государственный технический университет,  
Орел)*

*Предложена модель автоматизированной системы управления экологической безопасностью промышленно-транспортного комплекса (одной из важнейших составляющих экономики). Она основана на новом представлении объекта управления и идее адаптивности к изменениям, происходящим в окружающей среде и самом объекте, реализующейся включением в состав системы экспертно-информационной подсистемы. Рассмотрена структура данной подсистемы.*

Ключевые слова: система управления, адаптивное управление, автоматизация, промышленно-транспортный комплекс, экологическая безопасность.

### **1. Введение**

Промышленно-транспортный комплекс (ПТК) – важнейшая составляющая экономики РФ, необходимая для производства товаров и услуг, являющаяся крупнейшим источником занятости и дохода населения страны, и, одновременно, мощный источник техногенного загрязнения природной сферы [10]. Это

---

<sup>1</sup> Ольга Александровна Иващук, кандидат физико-математических наук, доцент ([ivascuk@orel.ru](mailto:ivascuk@orel.ru)).

<sup>2</sup> Игорь Сергеевич Константинов, доктор технических наук, профессор ([konstantinov@ostu.ru](mailto:konstantinov@ostu.ru)).

определяет необходимость создания эффективной системы управления экологической безопасностью (ЭБ) ПТК, а именно состоянием защищенности окружающей природной среды от негативных воздействий ПТК и их последствий при сохранении достаточных темпов развития самого комплекса. При этом следует учитывать особенности современного состояния ПТК в России, а также специфику формирования экологической ситуации на территории, находящейся в зоне влияния объектов промышленности и транспорта.

ПТК представляет собой сложную организационно-техническую систему, объединяющую промышленные и транспортные предприятия, подвижной состав всех видов собственности, а также сферу их проектирования, строительства, реконструкции, ремонта и содержания, дорожное хозяйство, службу управления движением.

Сегодня ко всем составляющим ПТК предъявляются требования организации инновационной деятельности. Они должны быть готовы и способны в любой момент и сжатые сроки перейти на создание новых, более эффективных или видоизмененных продукции и услуг, обладающих новым качеством и значительным потенциалом коммерческой реализации.

Как источник негативного техногенного воздействия на компоненты природной среды каждый элемент ПТК характеризуется своими особенностями, определяющими образование, распространение и накопление загрязнений различного вида в пространстве и в результате возможность возникновения зон экологически неблагоприятной обстановки, отличающихся по размерам и устойчивости. Здесь особую роль следует отвести передвижным источникам, прежде всего, автомобильному транспорту. Численность автомобилей в регионах России постоянно растет, они рассредоточены по всей территории и образуют потоки различной интенсивности на автодорогах. С этим связано постоянное изменение состояния природной среды (особенно воздушного бассейна) в населенных пунктах страны [2, 10].

Таким образом, современные условия развития ПТК в России определяют высокую динамику как самого комплекса (в том

числе всех его составляющих), так и экологической обстановки, формируемой на территории, находящейся в зоне влияния объектов промышленности и транспорта. В результате для обеспечения эффективного функционирования системы управления ЭБ ПТК необходимо выполнение таких требований, как гибкость и мобильность по отношению к изменениям в производственной сфере и адаптивность к текущим изменениям в окружающей среде.

## **2. Постановка задачи**

Управленческая деятельность в сфере ЭБ ПТК, осуществляемая сегодня в России (в различных ее субъектах, а также на отдельных объектах ПТК), базируется на использовании стационарных моделей. Это, например, модель предполагаемой антропогенной нагрузки на окружающую среду, модели нормальной и неблагоприятной экологической обстановки на рассматриваемой территории. Они формируются по результатам анализа деятельности различных объектов экономики и природно-климатических особенностей на рассматриваемой территории и установления на определенный срок экологических нормативов (в виде предельно допустимых воздействий различного вида от объектов ПТК на компоненты природной среды) [9, 11].

При этом принятие управленческих решений и реализация конкретных регулирующих мероприятий, необходимых по причине произошедших в ПТК или окружающей среде текущих изменений, влияющих на качество природной сферы, будет осуществляться с задержкой. Время задержки  $t_3$  может быть существенным и зависит от сроков выявления самих изменений и (связанного с этим) пересмотра и введения новых экологических нормативов для различных объектов ПТК.

Таким образом, существующий подход к управлению ЭБ ПТК не может обеспечить выполнение требования адаптивности, мобильности и гибкости, определяемые современными условиями развития ПТК в стране.

За время  $t_3$  управляемая система может выйти из области допустимых состояний, соответствующей приемлемому уровню

качества окружающей среды для проживания и деятельности людей на рассматриваемой территории. Более того, в результате достижения  $t_3$  некоторого критического значения, так же как и в результате выбора и реализации нерационального управляющего воздействия, траектория движения системы может зайти в область критического отклонения, при котором начнут возникать устойчивые в пространстве и времени экологически опасные зоны.

Для обеспечения результативного регулирования экологической обстановки, формируемой при взаимодействии объектов промышленности и транспорта с компонентами природной среды, была поставлена следующая задача. Разработать систему управления ЭБ ПТК, способную обеспечить

- получение полной и адекватной экоинформации об уровне ЭБ ПТК на данной территории, оперативное доведение ее до всех заинтересованных сторон (органов управления, специалистов-экспертов, общественности);

- выявление причинно-следственных связей и определение закономерностей функционирования ПТК и его воздействия на окружающую среду;

- формирование достаточно полного множества альтернативных сценариев управления, сформированных на основании прогноза развития сложившейся экологической ситуации и интегральной оценки результатов этого прогноза;

- выработку научно обоснованных управляющих решений и реализацию рациональных регулирующих мероприятий (в том числе оперативных) по снижению и предотвращению негативного воздействия ПТК на природную среду.

В связи с вышесказанным, подобная система управления должна оперативно и эффективно реагировать на текущие изменения в самом объекте управления и в окружающей среде.

Все это на сегодняшний момент возможно только при использовании автоматизации, компьютеризации, передовых информационных технологий на всех этапах управления: от наблюдения и контроля до принятия управленческих решений.

### 3. Модель объекта управления

При управлении ЭБ ПТК обеспечивается состояние защищенности природной среды на определенном уровне иерархии административно-территориального деления (федеральном, региональном, муниципальном, районном, а также на локальных территориях) от негативного влияния ПТК, действующего именно на рассматриваемой территории. При этом должно быть достигнуто такое функционирование образованных на данной территории природно-технических систем, при котором действительное (в данный момент времени  $t$ ) состояние компонентов природной среды  $X(t)$ , взаимодействующих с объектами промышленности и транспорта, будет максимально приближено к требуемому целевому состоянию  $X_0$ . Значение составляющих вектора  $X_0$  соответствует нормативам качества окружающей среды [11], таким как предельно-допустимые концентрации химических соединений в ее компонентах, предельно допустимые уровни и предельно-допустимые дозы физического воздействия (шумовое, электромагнитное, радиационное, тепловое и др.), предельно-допустимое размещение отходов и т.п.

Реально управляемыми являются параметры конкретных объектов ПТК, которые определяют условия и результат их функционирования как с экономической (объемы и качество продукции и услуг), так и с экологической (мощность негативного воздействия на природную среду) точки зрения.

Таким образом, объект управления – объект ЭБ ПТК – является сложной системой. Она не только имеет собственную траекторию движения в пространстве состояний, но и каждый из ее элементов имеет собственные, относительно самостоятельные, но взаимосвязанные тенденции к развитию их состояния. Изменения в траектории движения одной из подсистем ведут к изменениям траектории других. Поэтому важно выявить основные подсистемы объекта управления и определить множество параметров, которые определяют как траекторию движения каждой из них, так и влияние на изменение состояния других; особо важно выявить реально управляемые параметры.



В связи с вышесказанным будем рассматривать объект ЭБ ПТК как объект управления в виде двух устойчиво взаимодействующих подсистем:

– природный комплекс как организованная часть внешней среды (вычлененная из нее), взаимодействующая с ПТК, а именно *компоненты природной среды* (например, атмосферный воздух, акустическая среда, водные объекты и т.п.), на которые оказывают вредные воздействия объекты промышленности и транспорта на рассматриваемой территории и в которых распространяются и накапливаются загрязнения различного вида;

– непосредственно *ПТК*, функционирующий на рассматриваемой территории и представляющий собой, как указано выше, сложную динамическую организационно-техническую систему.

Исходя из современного состояния ПТК в стране, представляется рациональным провести, в свою очередь, декомпозицию ПТК на две составляющие, отличающиеся способами и условиями образования выбросов загрязнений: подсистему *стационарных источников ПТК* (промышленные и транспортно-дорожные предприятия) и подсистему *передвижных источников ПТК* (транспортные средства).

Модель объекта управления с указанием информационных потоков показана на рис. 1 [3].

На схеме выделены следующие параметры:

$X$  – вектор состояния природной среды на рассматриваемой территории. Его составляющие – выбранные для контроля показатели качества компонентов природной среды (концентрация вредных примесей, эквивалентный уровень шума и др.);

$Z_c, Z_n$  – векторы состояний стационарных и передвижных источников ПТК, одновременно характеризующих их деятельность как объектов экономики и определяющих мощность негативного воздействия на природную среду. Составляющие вектора  $Z_c$  – это, например, технологические и технические параметры, объемы и качество потребляемых ресурсов и готовой продукции, мощность очистных сооружений, а вектора  $Z_n$  – параметры транспортных потоков и т.п.;

$x_c, x_n$  ( $x_c, x_n \in X$ ) – векторы воздействий состояния компонентов природной среды на выделенные подсистемы ПТК;

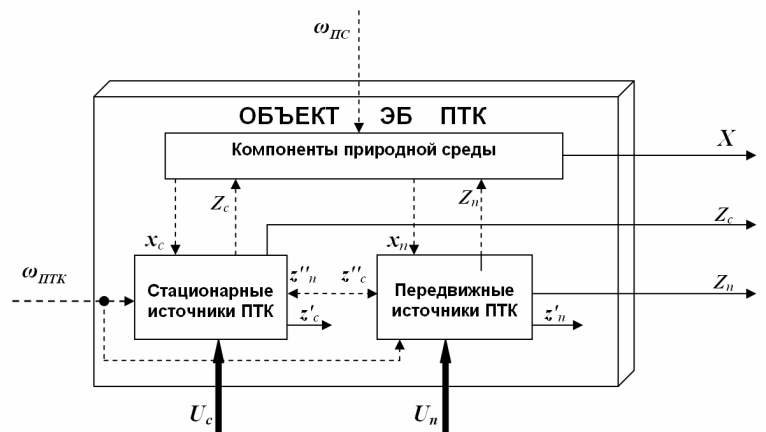


Рис. 1. Модель объекта управления – объекта ЭБ ПТК

$z'_c, z'_n$  ( $z'_c \in Z_c, z'_n \in Z_n$ ) – векторы результатов деятельности стационарных и передвижных источников ПТК именно как объектов экономики;

$z''_c, z''_n$  ( $z''_c \in Z_c, z''_n \in Z_n$ ) – векторы воздействий состояния выделенных составляющих ПТК друг на друга;

$\omega_{ПС}$  – вектор внешних воздействий на компоненты природной среды, которые влияют на распространение и накопление загрязнений, поступающих от ПТК, на рассматриваемой территории. К ним относятся, например, природно-климатические параметры, особенности инфраструктуры региона, фон;

$\omega_{ПТК}$  – вектор внешних воздействий на стационарные и передвижные источники ПТК, влияющих на результаты их деятельности, производственные и транспортные параметры, определяющие уровень экологической опасности;

$U_c, U_n$  – векторы управляющих воздействий на стационарные и передвижные источники ПТК.

Лица, принимающие управляющие решения, должны быть обеспечены всей необходимой информацией для выработки (в случае возникновения в момент времени  $t$  неблагоприятной экологической обстановки в зоне влияния ПТК) таких воздействий  $U_c(t)$  или  $U_n(t)$ , которые сведут к минимуму разность  $\Delta X(t)$

между фактическим  $X(t)$  и требуемым целевым состоянием  $X_0$  природной среды:  $\Delta X(t) \rightarrow 0$ . Для этого, прежде всего, необходимо организовать получение (в режиме реального времени) наиболее полного множества значений компонентов векторов  $X$ ,  $Z_c$ ,  $Z_n$  и векторов  $\omega_{\text{ПС}}$  и  $\omega_{\text{ПТК}}$ . Данная информация обеспечит знания о состоянии объекта управления, необходимые и достаточные для вывода причинно-следственных связей, проведения адекватной оценки (в том числе интегральной оценки) текущего и прогнозного уровней ЭБ ПТК на рассматриваемой территории.

То, что управляющие воздействия могут быть связаны с варьированием и составляющих вектора  $Z_c$ , и составляющих вектора  $Z_n$ , позволит обеспечить оперативное изменение текущей экологической обстановки (ее нормализацию), реализовать наиболее рациональные для данных сложившихся условий мероприятия, эффективные как с экологической, так и с экономической точки зрения.

#### **4. Автоматизированная система управления ЭБ ПТК**

Основные принципы создания автоматизированных систем управления (АСУ) современными сложными организационно-техническими системами и конкретные примеры их реализации рассматриваются, например, в работах [5-8].

Предлагается следующая структура АСУ ЭБ ПТК, показанная на рис. 2.

В ее состав входят следующие составляющие: *объект управления*; *управляющая система*; *система экомониторинга*; *экспертно-информационная система* (ЭИС).

Структура объекта управления – объекта ЭБ ПТК – рассмотрена выше. На рис. 2 вектор  $Y = \{X, Z_c, Z_n\}$  характеризует состояние объекта (его подсистем);  $\omega = \{\omega_{\text{ПС}}, \omega_{\text{ПТК}}\}$  – вектор внешних воздействий на объект (его подсистемы);  $U = \{U_c, U_n\}$  – вектор управляющих воздействий на объект, а именно его подсистемы, параметры которых  $Z_c$  и  $Z_n$  (рис. 1) варьируются с целью предотвращения или снижения негативного воздействия ПТК на природные среды рассматриваемой территории.

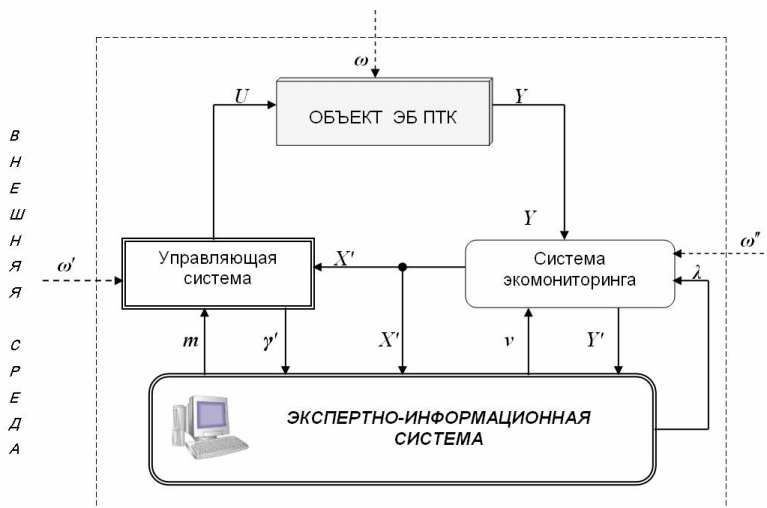


Рис. 2. Общая структура АСУ ЭБ ПТК

На уровне управляющей системы осуществляется принятие управляющих решений и реализация конкретных управляющих воздействий на объектах промышленности и транспорта. Для выбора и проведения природоохранных мероприятий в ПТК, рациональных как с экологической, так и с экономической точки зрения (в данных сложившихся социально-экономических и природно-климатических условиях), управляющая система должна иметь достоверную информацию о текущем уровне ЭБ ПТК на рассматриваемой территории (вектор  $X'$ ), а также достаточно полное множество альтернативных сценариев управления (вектор  $m$ ), сформированных на основании прогноза развития экологической ситуации (сложившейся при воздействии объектов ПТК на природную сферу рассматриваемой территории) и интегральной оценки результатов этого прогноза. Эти задачи решаются на уровне специализированных подсистем АСУ: системы экомониторинга и ЭИС. Вектор  $\omega'$  – вектор внешних воздействий на управляющую систему, который позволяет при выработке управляющих решений использовать внешнюю информацию. Это, например, информация об изменениях нормативной и законодательной базы, инфраструктуры рассматри-

ваемой территории, деятельности различных предприятий, о внедрении новых технологий, а также процессах инфляции и ценовой политики, уровне жизни населения, развитии производства в мире и РФ.

Определим следующие основные функции системы экомониторинга как составляющей АСУ ЭБ ПТК:

- контроль показателей качества компонентов природной среды, на которые оказывает негативное влияние ПТК на рассматриваемой территории;

- контроль параметров, характеризующих состояние стационарных и передвижных объектов ПТК и определяющих уровень их ЭБ;

- контроль параметров внешнего воздействия на подсистемы АСУ ЭБ ПТК;

- предварительная оценка текущего уровня ЭБ ПТК на рассматриваемой территории.

Указанные функции реализуются в двух специализированных блоках [4]. Так, сбор первичной информации (компоненты векторов  $Y$ ,  $\omega$ ,  $\omega'$ ,  $\omega''$ , где  $\omega''$  – вектор внешних воздействий на систему экомониторинга) осуществляется в *контрольно-измерительном блоке*. Результат измерений – вектор  $Y'$ .

В другом блоке осуществляется *предварительная оценка текущего состояния ЭБ ПТК*, результат которой в виде вектора  $X'$  поступает в управляющую систему, а также (вместе с вектором  $Y'$ ) в ЭИС.

При построении и организации функционирования системы экомониторинга (ее подсистем) необходимо решить несколько параллельных задач:

- определить наиболее рациональную пространственную структуру измерительной сети (необходимое и достаточное количество стационарных и, если необходимо, мобильных постов контроля, их размещение на рассматриваемой территории);

- определить рациональную приборную комплектацию;

- обеспечить систему экомониторинга адекватными моделями, необходимыми для осуществления предварительной оценки уровня ЭБ ПТК на рассматриваемой территории.

Подсистема ЭИС включена в состав АСУ для реализации следующих основных функций:

- формирование альтернативных сценариев управления, которые передаются в управляющую систему по каналам информационных потоков  $m$ ;

- моделирование оптимальной сети наблюдения на рассматриваемой территории и рациональной (в данных условиях) приборной базы, результаты которого поступают по информационным потокам  $\lambda$  в систему экомониторинга (контрольно-измерительный блок);

- разработка моделей, необходимых для осуществления адекватной предварительной оценки фактической экологической обстановки, сформированной в результате воздействия объектов ПТК на компоненты природной среды рассматриваемой территории, которые по информационным потокам  $\nu$  поступают в систему экомониторинга (блок предварительной оценки уровня ЭБ ПТК).

Таким образом, именно на данном уровне АСУ ЭБ ПТК определено генерирование моделей, обеспечивающих своевременную адаптацию управляющей системы и системы экомониторинга к текущим изменениям, происходящим в объекте управления и во внешней среде.

В результате в структуре АСУ образуются два внутренних контура управления, в каждом из которых субъектом управления выступает ЭИС.

Первый контур включает ЭИС и управляющую систему АСУ ЭБ ПТК (в данном случае это объект управления). Вектор  $m$  представляет собой управляющий сигнал. Потоки обратной связи  $\gamma'$ , поступающие в ЭИС, – это результаты выбора для практической реализации конкретных сценариев управления, рациональных как с экологической, так и с экономической точки зрения. Векторы  $\omega'$  и  $X'$  в данном контуре характеризуют внешние воздействия на объект управления.

Во втором контуре объектом управления выступает система экомониторинга. Векторы  $\lambda$  и  $\nu$  – управляющие сигналы, поступающие в соответствующие элементы системы экомониторинга. Векторы  $X'$  и  $Y'$  – сигналы обратной связи, поступающие от этих

элементов в ЭИС, а  $Y$  и  $\omega''$  определяют в данном контуре внешние воздействия на систему экомониторинга.

### **5. Экспертно-информационная система как составляющая АСУ ЭБ ПТК**

Итак, на уровне ЭИС обеспечивается выработка всех составляющих векторов  $m$ ,  $\lambda$  и  $\nu$ , необходимых для адаптивного управления объектом ЭБ ПТК и самой АСУ. Полный набор функций данной подсистемы, определяющий ее структуру, следующий:

- накопление, обработка и хранение данных;
- формирование и хранение моделей;
- прогнозирование развития сложившейся экологической ситуации без реализации управляющих воздействий;
- расчет показателей качества компонентов природной среды (их изменений) на рассматриваемой территории с учетом существующей и предполагаемой техногенной нагрузки и возможных результатов управляющих воздействий;
- интегральная оценка прогнозируемого состояния ЭБ ПТК на рассматриваемой территории;
- расчет параметров ПТК (характеризующих их деятельность как объектов экономики и одновременно определяющих уровень их негативного воздействия на компоненты природной среды) по требуемому состоянию природной среды;
- электронное картографирование с визуализацией данных экомониторинга, результатов расчетов и имитационных экспериментов;
- формирование альтернативных сценариев управления для предотвращения или снижения (по возможности, ликвидации) негативного воздействия ПТК на природную сферу рассматриваемой территории;
- обоснование рациональной приборной комплектации и оптимальной сети наблюдения на рассматриваемой территории.

На рис. 3 представлена обобщенная схема функционирования ЭИС как составляющей АСУ ЭБ ПТК.

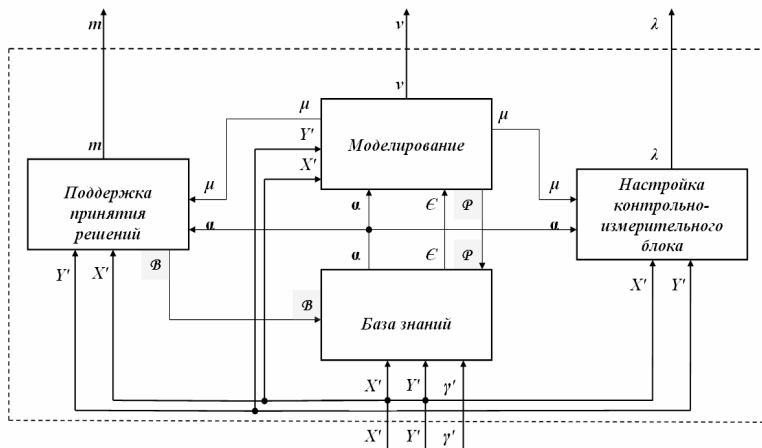


Рис. 3. Схема функционирования ЭИС в составе АСУ ЭБ ПТК

Данная система, в свою очередь, включает четыре основные подсистемы: *База знаний*; *Моделирование*; *Поддержка принятия решений*; *Настройка контрольно-измерительного блока*.

Подсистема *База знаний* состоит из двух основных составляющих. Первая осуществляет хранение данных, необходимых для проведения моделирования, расчетов и имитационных экспериментов и поступающих в виде потоков информации  $\alpha$  в другие блоки ЭИС. Здесь создаются специализированные базы и банки данных: *базы данных экомониторинга и официальной статистики*, *банк данных потенциальных природоохранных мероприятий в ПТК* (формируемые на основании векторов  $X'$  и  $Y'$ ), *базы данных расчетов и имитационных экспериментов* (формируемые на основании вектора  $\Phi$ ), а также *банк результатов выбранных для реализации сценариев управления* (формируемый из составляющих вектора  $\gamma'$ ).

Во второй составляющей *Базы знаний* содержится наиболее полное множество правил, необходимых для формирования моделей и поступающих в виде составляющих вектора  $\epsilon$  другую важнейшую подсистему ЭИС – *Моделирование*.

На уровне подсистемы *Моделирование* генерируются различные математические модели, а также создаются электронные



карты. В нее поступают необходимые для процесса моделирования (в том числе для переобучения уже созданных моделей) данные (составляющие вектора  $\alpha$ ) и правила (составляющие вектора  $\epsilon$ ) из *Базы знаний*. При этом при выявлении различных причинно-следственных связей могут быть сформулированы новые правила (потоки обратной связи  $\mathcal{P}$ ). Информация, поступающая в подсистему *Моделирование* с векторами  $X'$  и  $Y'$  (о текущем состоянии объекта управления АСУ – объекта ЭБ ПТК, изменениях этого состояния, изменений во внешней среде, влияющих на функционирование самого объекта и подсистем АСУ), позволяет оперативно выявить необходимость разработки новых и корректировки уже созданных моделей. Это играет важную роль при обеспечении адаптивного управления.

Все сформированные модели хранятся в специализированном блоке данной подсистемы (*базе моделей*), откуда они при необходимости поставляются (в виде составляющих вектора  $\mu$ ) в различные блоки других подсистем *ЭИС* для проведения конкретных расчетов и имитационных экспериментов.

Модели для оценки фактического уровня ЭБ ПТК также формируются в подсистеме *Моделирование* и далее поступают (в виде составляющих вектора  $\nu$ ) в *Систему экомониторинга*.

На уровне подсистемы *Поддержка принятия решений*, структура которой показана на рис. 4, формируются и передаются в управляющую систему альтернативные сценарии управления объектом ЭБ ПТК (составляющие вектора  $t$ ). Выделим следующие блоки:

– *Блок формирования прогнозных сценариев развития экологической ситуации*, на уровне которого определяется изменение сложившейся под влиянием объектов ПТК экологической ситуации на рассматриваемой территории (информация из векторов  $X'$  и  $Y'$ ) при различных возможных внешних воздействиях (составляющие вектора  $\alpha$ ) без реализации управленческих решений;

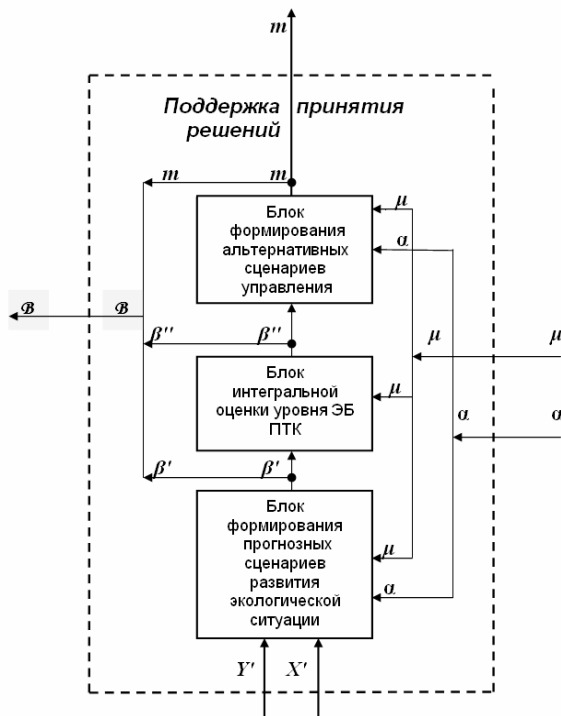


Рис. 4 Структура подсистемы ЭИС «Поддержка принятия решений»

– Блок интегральной оценки уровня ЭБ ПТК, осуществляемой по спрогнозированному состоянию компонентов природной среды (вектор  $\beta'$ );

– Блок формирования альтернативных сценариев управления, в котором на основе проведенных оценок и прогнозов (вектор  $\beta''$ ), а также в соответствии с созданными моделями благоприятной экологической обстановки и информации о потенциальных регулирующих мероприятиях в ПТК (составляющие вектора  $\alpha$ ) определяются возможные варианты управляющих воздействий и формируются альтернативные сценарии управления ЭБ ПТК (составляющие вектора  $t$ ).

В каждый из *Блоков* подсистемы *Поддержка принятия решений* поступают информационные потоки  $\mu$ , которые, как указывалось выше, представляют собой необходимые для расчетов и имитационных экспериментов модели.

Вектор  $\mathcal{B} = \{\beta', \beta'', m\}$  поставляет информацию из рассмотренных *Блоков* в различные базы и банки данных *Базы знаний*. Данная информация может использоваться как при разработке новых или корректировке, переобучении уже созданных ранее моделей, так и для избежания проведения повторяющихся вычислений, проделанных при уже имеющем место (в прошедший период) состоянии векторов  $X'$  и  $Y'$ .

В следующей подсистеме *ЭИС*, называемой *Настройка контрольно-измерительного блока*, при необходимости (выявленной по состоянию вектора  $Y'$ ) на основе специально разработанной модели (составляющая вектора  $\mu$ ) осуществляется рациональный выбор необходимых приборов из всевозможных альтернатив, предлагаемых на отечественном и зарубежном рынке, а также производится оценка приборного обеспечения, предлагаемого на замену уже используемому. Кроме того, на уровне данной подсистемы, также в случае возникновения необходимости (выявленной по состоянию векторов  $X'$  и  $Y'$ ), осуществляется изменение местоположения или числа постов контроля измерительной сети системы экомониторинга. Для этого используются прогностические модели (составляющие вектора  $\mu$ ), а также данные из *Базы знаний* (составляющие вектора  $\alpha$ ).

Результат функционирования подсистемы *Настройка контрольно-измерительного блока* в виде вектора  $\lambda$  поступает в систему экомониторинга.

## 6. Заключение

Таким образом, предложены новая модель объекта ЭБ ПТК как объекта управления и структура АСУ ЭБ ПТК, включающая систему мониторинга и *ЭИС*, постоянно взаимодействующую с другими подсистемами АСУ, осуществляя гибкое управление ими. При внедрении для практического использования они

будут обеспечивать адаптивное управление ЭБ ПТК, при котором система управления и все ее составляющие оперативно реагируют на изменения в самом объекте управления и во внешней среде.

Предлагаемая модель АСУ является универсальной по отношению к выбираемой территории, находящейся в зоне влияния ПТК, и к выбору самих объектов ПТК как источников негативного техногенного воздействия. Она может быть использована для эффективного научно обоснованного управления ЭБ ПТК на любом уровне иерархии административно-территориального деления, а также на отдельных объектах промышленности и транспорта.

Результат внедрения АСУ ЭБ ПТК будет иметь как социальные, так и экономические эффекты. Проведем их качественную оценку. Так, положительный социальный эффект от создания и практического использования подобной АСУ связан со следующими результатами:

- повышение эффективности деятельности органов управления ЭБ на рассматриваемой территории;
- обеспечение ЭБ ПТК и улучшение экологической обстановки;
- повышение уровня контроля и управления в сфере природопользования;
- улучшение информированности всех заинтересованных сторон (органов управления, специалистов-экспертов, общественности);
- повышение эффективности, оперативности и качества разработки и реализации природоохранных мероприятий в ПТК и природоохранных программ на рассматриваемой территории.

Источниками экономических эффектов являются увеличение эффективности программ и проектов по обеспечению ЭБ ПТК, ускорение проведения экспертиз, уменьшение затрат на оценку уровня ЭБ ПТК, а также на ликвидацию экологических последствий от негативного воздействия на компоненты природной среды объектов промышленности и транспорта за счет:

- улучшения информационной поддержки принятия управленческих решений;

- увеличения оперативности управленческой деятельности в сфере обеспечения ЭБ ПТК;
- увеличения оперативности ликвидации экологических последствий;
- повышения обоснованности принятия управленческих решений.

Конкретные суммы экономического эффекта зависят от того, для какой именно территории и объекта (или совокупности объектов) ПТК разрабатывается АСУ ЭБ ПТК.

Так, на основе разработанных теоретических положений была реализована конкретная АСУ ЭБ ПТК для густонаселенных городских территорий, где основным источником негативного техногенного воздействия на природную сферу (прежде всего, воздушный бассейн) является автомобильный транспорт [2]. На примере Орловского региона рассчитан экономический эффект от реализации (при функционирования подобной системы управления) именно *оперативных управленческих воздействий*. С учетом общих затрат на оснащение и поддержку работы АСУ и денежной оценки снижения негативных изменений только в атмосферном воздухе на рассматриваемой территории (проведенной по методике [1]) он достигает значений, превышающих 1,5 млн. руб./год (в ценах 2008 г.) в зависимости от реализуемых управляющих воздействий.

### Литература

1. *Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба*. Утв. Госкомитетом РФ по охране окружающей среды 09.03.1999 г. – М. - 1999. – 43 с.
2. ИВАЩУК О. А. *Повышение экологической безопасности автотранспорта региона на основе систем мониторинга с использованием интеллектуальных технологий*: монография. – Орел: изд-во ОрелГАУ, 2008. – 244 с.
3. ИВАЩУК О. А. *Управление экологической безопасностью промышленно-транспортного комплекса* // Известия ОрелГТУ. Информационные системы и технологии. – 2009. - №1. – С. 16-22.

4. ИВАЩУК О. А., ЧУДНЫЙ Ю. П. *Построение системы экомониторинга при организации автоматизированного управления экологической безопасностью промышленно-транспортного комплекса* // Известия ОрелГТУ. Информационные системы и технологии. – 2009. – №2. – С. 11-20.
5. КОНСТАНТИНОВ И. С., КУЗИЧКИН О. Р. *Организация систем автоматизированного электромагнитного контроля геодинамических объектов* // Известия ОрелГТУ. Информационные системы и технологии. – 2008. – №3-4. – С. 13-17.
6. КОСЬКИН А. В. *Информационно-аналитические ресурсы для управления организационно-техническими системами: монография* / Под общ. ред. И. С. Константинова. – М.: Машиностроение-1, 2006. – 208 с.
7. КОСЬКИН А. В., ВЕРИГИН И. С., КОНСТАНТИНОВ И. С. *Организационные системы в сфере образования: монография* / Под общ. ред. И. С. Константинова. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 368 с.
8. МЕНЬКОВ А. В., ОСТРЕЙКОВСКИЙ В. А. *Теоретические основы автоматизированного управления*. – М.: Изд-во Оникс, 2005. – 640 с.
9. *Об охране окружающей среды: федер. закон: [принят Гос. Думой 20 декабря 2001 г.: одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 г.]*. – М.: Ось-89, 2003. – 64 с.
10. *О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2007 году: государственный доклад* / Министерство природных ресурсов и экологии РФ; под ред. Н. А. Туманова. – М.: АНО «Центр международных проектов», 2008. – 504 с.
11. *Экологическая экспертиза* / В. К. Донченко и [др.]; под ред. проф. В. М. Питулько. – Изд. 2-е. – М.: Издательский центр «Академия», 2004. – 480 с.

## **SUPPORTING ECOLOGICAL SAFETY ADAPTIVE MANAGEMENT IN INDUSTRIAL AND TRANSPORT COMPLEX**

**Olga Ivashchuk**, Oryol State Agrarian University, Oryol, Cand. Sc., assistant professor (ivascuk@orel.ru).

**Igor Konstantinov**, Oryol State Technical University, Oryol, Doctor of Science, professor (konstantinov@ostu.ru)

*Abstract: The model of the ecological safety automated control system for industrial and transport complex (one of the major branches of economy) is proposed. The model is based on the new representation of control object and the idea of adaptivity subject to the changes in environment and the object itself. The idea is realized by including an expert information subsystem into the system. The structure of this subsystem is considered.*

**Keywords:** management system, adaptive management, automation, industrial and transport complex, ecological safety.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии М.В. Губко*

УДК 004 + 336  
ББК 20 + 65

## **МОДЕЛЬ НОРМАЛИЗОВАННОЙ ЭКОНОМИКИ (НЭк-МОДЕЛЬ): ОСНОВЫ КОНЦЕПЦИИ**

**Ильин В. Д.<sup>1</sup>**

*(Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем информатики РАН, Москва)*

*НЭк-модель ориентирована на развитие национальной экономики. Она адекватна современным экономическим отношениям и информационным технологиям. В отличие от нынешних денег, применяемых как товар-посредник, в НЭк-модели деньги служат электронными документами, удостоверяющими стоимость товаров и имущественный статус участников экономических отношений. Определены правила денежной эмиссии, банковской деятельности, инвестирования и экспорта/импорта.*

Ключевые слова: экономическая модель, НЭк-модель, деньги, имущественный статус, банковская деятельность, инвестирование, экспорт/импорт, информатизация экономической деятельности.

### **Введение**

Модель экономики – составляющая модели управления статусным соперничеством [4], изобретением которой автор начал заниматься в 1990-е гг. На стартовом этапе исследований были предложены модели налогообложения, проектирования бюджета и ресурсного обоснования государственных решений, ориентированные на развитие потенциала страны [4]. Особое внима-

---

<sup>1</sup> Владимир Дмитриевич Ильин, доктор технических наук, профессор (vdilyin@ipiran.ru).



ние было сосредоточено на задачах ресурсного обоснования государственных управляющих воздействий и проектирования бюджета. Методы решения этих задач позднее были усовершенствованы в [3]. Концепции денег и банковской деятельности [1, 7, 8, 10] воспринимались тогда как неадекватные задачам устойчивого развития национальных экономик и их эффективного глобального взаимодействия. То, что в банковской системе в любой момент времени сумма  $A$  эмитированных кредитных денег и выданных в долг (с процентами) меньше суммы  $B$  долга, который обязаны вернуть заёмщики ( $B - A$ : проценты за кредиты), выглядело вызовом здравому смыслу [ведь  $(B - A)$  не существует!] В так устроенной банковской системе полностью вернуть долги невозможно («по определению»). Почему деньги являются сверхдоходным товаром-посредником, производство которого не связано чёткими правилами с имущественными сделками на рынке реальных товаров? Почему за игру на фондовых биржах должны расплачиваться не только игроки? Подобные необъяснённости вызвали желание не просто разобраться, а изобрести более адекватную экономическую модель.

С 2007 г. была активизирована работа над *моделью денег, являющихся не товаром-посредником, а программно реализованным средством представления стоимости товаров и имущественного статуса субъектов имущественных отношений*. Экономисты продолжали держаться концепции денег как товара-посредника [9, 11], не реагируя на принципиальные технологические перемены в возможностях документирования экономических сделок. Очередной кризис, заявивший о себе в России в 2008 г., послужил дополнительным стимулом: в ноябре 2008 г. первая версия *модели нормализованной экономики* (позднее получившей и короткое имя – *НЭк-модель*) была представлена в монографии [5]. НЭк-модель включает концепции денег, банковской деятельности, инвестирования и внешнего обмена (экспорта/импорта). Для обсуждения НЭк-модели в январе 2009 г. был создан специальный сайт [6]. Работа над совершенствованием НЭк-модели продолжалась: были изменены правила

эмиссии денег и банковской деятельности; уточнён ряд других положений. Представленная здесь версия НЭк-модели существенно отличается от опубликованной в [5]. Улучшению текста статьи способствовала конструктивная критика рецензента.

### СРЕДСТВА ОПИСАНИЯ

В статье применяется часть средств комплекса *Tsm* унифицированной записи формул, выделения частей текста в описаниях символьных моделей и замены выбранными сокращениями часто повторяющихся фрагментов [2].

Для выделения определений, замечаний и примеров используются следующие средства:

□<текст>□ ≈ утверждение (определение, аксиома, теорема, следствие и др.); символ ≈ заменяет слово «означает»;

◇<текст>◇ ≈ замечание;

☀<текст>☀ ≈ пример.

## **1. Правила экономической деятельности: соответствие задачам защиты и развития потенциала страны**

Установленные государством правила экономической деятельности и применяемые средства их реализации (включая контроль и санкции за нарушения) ограничивают действия участников экономических отношений, направляемые стремлением к выгоде (прибыли, увеличению доли рынка и др.).

□*Цель государственного управления* – защита потенциала страны и его развитие посредством правового регулирования процессов статусной конкуренции между физическими и юридическими лицами [4].□

□*Потенциал страны* определяется характеристиками населения, естественной среды его обитания и искусственных систем организации и обеспечения жизни.□

Установленные законом правила и государственные управляющие воздействия должны направлять экономическую дея-

тельность населения на защиту и развитие потенциала страны. Длительное несоответствие правил экономического поведения населения задачам защиты и развития потенциала страны приводит в итоге к исчезновению такой государственной системы, а страна становится материалом для дробления или присоединения.

Нынешние правила экономической деятельности не способствуют решению указанных задач. Направляемая стремлением к повышению имущественного статуса<sup>1</sup> своих корпораций, значительная часть бизнес-сообщества интенсивно хлопочет о стирании национальных границ в экономических отношениях (чтобы увеличить доступ к дешёвой рабочей силе, энергоносителям, сырью и др. ресурсам). Для этого она активно инициирует создание различных средств глобального управления экономическим поведением, которые бы стали выше национальных.

## **2. О необходимости совершенствования экономического механизма**

Производство товаров и имущественный обмен связаны с тех пор, как возникло разделение труда (рис. 1). Нынешний экономический механизм остаётся таким же, каким был в доинтернетную эпоху. По-прежнему деньги служат товаром-посредником, с помощью которого реализуется имущественный обмен.

◇ При существующих правилах экономической деятельности государство может легко утратить контроль даже над корпорациями, выпускающими высокоприоритетные товары массового спроса. Схема хорошо известна: корпорации набирают в иностранных банках долги, которые не в состоянии отдать. В

---

<sup>1</sup> □ *Статус* – положение физического или юридического лица в некоторой системе статусного соперничества [4]. □

результате собственниками имущества таких корпораций становятся иностранные банки.◇

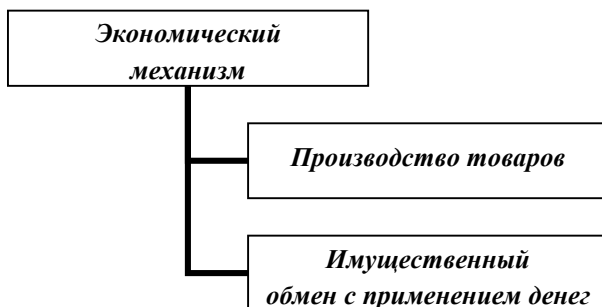


Рис. 1. Экономический механизм при разделении труда

Взгляд на деньги как на товар устойчиво доминирует в среде экономистов [9, 11], многие из которых считают, что если деньги будут иметь стопроцентное золотое обеспечение, то экономика приобретёт устойчивость.

◇При «золотом подходе» наибольшее количество денег имела бы страна, обладающая наибольшим количеством золота и передовыми технологиями его добычи и обработки. В частности, в ЮАР находится крупнейшее в мире месторождение руд золота, содержащих уран (Витватерсранд, провинция Трансвааль). Запасы золота Витватерсранда оцениваются десятками тысяч тонн.◇

При таком подходе значительная часть ресурсов будет направлена не на производство необходимых для жизни товаров, а на производство и приобретение «золотого», «алмазного» или ещё какого-то «драгоценного обеспечения» денег. Кроме того, реализация концепции денег, обеспеченных «чем-то драгоценным», связана с непростой проблемой контроля наличия «драгоценного обеспечения» (необходимый текущий контроль заявленного количества «драгоценного обеспечения» – задача без практического решения).

В наши дни деньги – это сверхдоходный товар, в распоряжении производителей которого достаточно способов выгодных для себя изменений количества этого товара на рынке и управления его доступностью. Банки порождают кредитные деньги, не связанные со стоимостью появляющихся на рынке товаров, и продают их «с процентами». Фондовые рынки с встроенным механизмом спекулятивной паники, централизованным управлением, «иконными» индексами деловой активности, сессиями и глобальным оповещением не уступают в неадекватности существующим моделям денег и банковской деятельности. Внешний имущественный обмен (экспорт и импорт) выглядит не лучше. Несостоятельность ныне действующего экономического механизма подтверждает и то, что финансовый сектор экономики стал важнее основного (производящего необходимые для жизни товары: продукты питания, жильё и др.).

### **3. Экономический механизм НЭк-системы**

*◇В соответствии с НЭк-моделью экономическая деятельность должна быть ориентирована на решение задач защиты и развития потенциала страны, под юрисдикцией которой находится НЭк-система<sup>1</sup>.◇*

Исходим из того, что экономическая состоятельность любой страны определяется её способностью производить достаточное количество товаров, необходимых для благополучной жизни людей.

□Экономический механизм НЭк-системы (*НЭк-механизм*) состоит из средств производства товаров, их хранения, доставки и продажи (*средств производства и реализации*) и средств документирования результатов экономической деятельности (*средств документирования<sup>2</sup>*), необходимых в правовых имуще-

---

<sup>1</sup> Экономическая система, воплощающая НЭк-модель.

<sup>2</sup> Далее везде имеются в виду документирование результатов экономической деятельности.

ственных отношениях [4] между гражданами, корпорациями и государством.□

*Документирование* осуществляется на основе современных информационных технологий (реализуемых в *s*-среде [5]). Применяются электронные деньги (см. раздел 3.1) и унифицированные договорные документы (*договора*), оформляемые при сделках купли – продажи товаров, кредитовании этих сделок и инвестировании в производство товаров.

□ Имуущественный обмен с применением денег и договоров (*НЭк-обмен*) – часть НЭк-механизма, необходимая в условиях разделения труда и реализации правовых имуущественных отношений.□

□Имуущественные объекты НЭк-системы (*НЭк-объекты*) – это принадлежащие физическим и юридическим лицам (*НЭк-субъектам*) средства производства и реализации, а также предметы потребления.□ (рис. 2)

◇*Каждому НЭк-объекту поставлена в соответствие электронная унифицированная спецификация*, в которой указаны его наименование, назначение и характеристики. Если это произведённый объект, то указаны также производитель, даты выпуска и окончания срока годности. Для продающегося объекта указаны стоимость и правила поставки.◇

*Спецификация НЭк-объекта* служит документом, представляющим его как товар. В технологии документирования она рассматривается как *s*-модель товара [5].

□*Товар* – продаваемый НЭк-объект.□

☼*Предметы потребления, отнесённые к товарам*: земельные участки; вода; продукты питания; предметы одежды и обуви; электрическая и тепловая энергия; жилые и нежилые помещения, дороги и др. сооружения; патенты на открытия и изобретения; проектная, конструкторская и научно-исследовательская документация; образовательные, оздоровительные и лечебные услуги; машины, механизмы, инструменты и приспособления различного назначения; услуги связи; транс-

портные услуги; сервисы, реализованные в *s*-среде (электронная почта, поиск, сервисы имущественного обмена и др.) и др.☼

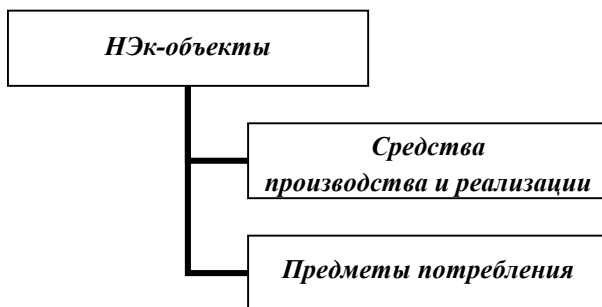


Рис. 2. Классы НЭк-объектов

◇Услуги – один из видов предметов потребления.◇

☼Средства производства и реализации: предприятия водоснабжения; сельскохозяйственные предприятия; предприятия, производящие продукты питания (путём переработки сельскохозяйственной продукции); предприятия, производящие предметы одежды и обуви; предприятия электро- и теплоснабжения; предприятия, строящие здания (жилые и иного назначения), дороги и др. сооружения; проектные и конструкторские бюро, научно-исследовательские организации; образовательные, оздоровительные и лечебные учреждения и др.☼

### 3.1. ДЕНЕЖНАЯ СИСТЕМА

Эмиссия и распространение нынешних денег (являющихся товаром-посредником) не связаны чёткими правилами со сделками купли – продажи реальных товаров.

◇На данном этапе развития имущественных отношений суть денежной проблемы – найти реализуемый (на основе современных информационных технологий) способ документального отражения стоимости товаров и имущественного статуса участников экономической деятельности, при котором изменение объёма их имущественного права достижимо

только в результате сделок купли – продажи товаров и договорного инвестирования в их производство.

В НЭк-модели денежная проблема сформулирована и решена с учётом нынешней экономической реальности и возможностей её поэтапного изменения.◇

Принципиальные отличия денежной системы НЭк-модели от других (см., напр., [1, 7-11]) определены в следующих утверждениях:

1. □*НЭк-деньги*<sup>1</sup> – программно реализованное (в *s*-среде [5]) средство документального представления стоимости товаров и имущественных статусов НЭк-субъектов (*НЭк-статусов*).

Представлены документальными записями в унифицированных счетах субъектов, удостоверяющими их имущественное право на долю стоимости товаров НЭк-системы и имущественные обязательства (суммы долгов) по отношению к другим субъектам. Каждый субъект имеет единственный счёт.□

2. Счёт субъекта представляет собой унифицированный электронный документ, состоящий из частей, каждая из которых соответствует валюте (рублю, юаню или др.), в которой совершает сделки этот субъект. Часть включает следующие основные разделы:

*Располагаю;*

*Кредитование;*

*Инвестирование;*

*Налоги и сборы;*

*Взносы (в фонды социальной защиты, благотворительные и др.);*

*Дарение.*

В разделе *Располагаю* – сумма денег, которую можно использовать для любых сертифицированных сделок (оплаты

---

<sup>1</sup> Деньги, эмитируемые и применяемые по правилам, определённым в НЭк-системе. Далее: деньги.



товаров, кредитования, инвестирования и др.) данной НЭк-системы.

В разделе *Кредитование* – подразделы *Выдано* (сумма денег, выданных в кредит) и *Получено* (сумма заёмных денег).

В разделе *Инвестирование* – подразделы *Вложено* (сумма инвестированных денег) и *Получено* (сумма полученных инвестиций).

Предусмотрены подразделы и в других разделах. Задав отрезок времени, можно получить детализацию по подразделам для любого раздела счёта.

3. *Совокупность допустимых операций* (при документировании сделок) определяется принадлежностью суммы денег к подразделу счёта (☼сумма из подраздела *Получено* раздела *Кредитование* не может использоваться для выдачи кредитов; сумма из подраздела *Получено* раздела *Инвестирование* может использоваться только для оплаты сделок, типы которых перечислены в конкретных договорах об инвестировании☼).

4. *Право эмиссии денег и управления процессами документирования сделок принадлежит банку-регулятору* (являющемуся государственным некоммерческим учреждением).

5. *Деньги на счетах субъектов* (включая счёт банка-регулятора) рассматриваются банком-регулятором как *занятые* и *незанятые* (которые, в отличие от *занятых*, применимы в любых сделках данной системы).

Суммы *занятых* денег находятся в подразделах *Получено* разделов *Кредитование* и *Инвестирование*, а суммы *незанятых* – в разделах *Располагаю* всех субъектов и в разделе *Возвращено* банка-регулятора (см. раздел 3.2.).

6. Обслуживание сделок осуществляют банки-провайдеры (под управлением банка-регулятора).

7. Программно реализованная *эмиссия денег* осуществляется банком-регулятором только тогда, когда общесистемная сумма *незанятых* денег меньше суммы, необходимой для обслуживания очередного запроса банка-провайдера.

8.  $\diamond$ НЭк-деньги не являются товаром-посредником: ими нельзя торговать, как в эти дни торгуют процентными кредитами и валютой. $\diamond$

9. В НЭк-системе технологически нереализуемы состояния недостатка или избытка денег.

$\diamond$ С точки зрения специалиста по информационным технологиям, унифицированный счёт субъекта – это совокупность файлов, хранящихся на накопителях электронных банков (реализованных на базе *s*-машин [5]). Персональные банки (как аппаратные средства) – это переносимые устройства (типа современных коммуникаторов), а обслуживающие их банки-провайдеры – это серверы, взаимодействующие с персональными банками обслуживаемых субъектов, между собой и с серверами банка-регулятора. Программно реализуемые записи в файлах счетов имеют право инициировать только субъекты, совершающие сделку. Для этого они используют свои персональные банки. Запросы на обслуживание сделки получают банки-провайдеры, банковскими сервисами которых пользуются совершающие сделку субъекты. В базах данных банков-провайдеров сохраняются документы по всем обслуженным сделкам (за период времени, установленный законом данной НЭк-системы). В персональных банках субъектов сохраняются документы по сделкам с их участием. $\diamond$

$\diamond$ Запрос на кредит банка-провайдера к банку-регулятору допустим только в том случае, если стоимость оплачиваемого товара превышает сумму в разделе *Располагаю* счета покупателя (при этом в разделе *Располагаю* банка-провайдера находится сумма, недостаточная для предоставления кредита). Банк-провайдер, получив кредит, оформляет кредит покупателю товара, а затем незамедлительно выполняет операцию оплаты товара, под покупку которого оформлен кредит. $\diamond$

$\diamond$ Заёмщики возвращают долги тем, у кого брали: покупатели товаров – банкам-провайдерам, а те – банку-регулятору. $\diamond$

Схема оплаты товара показана на рис. 3.

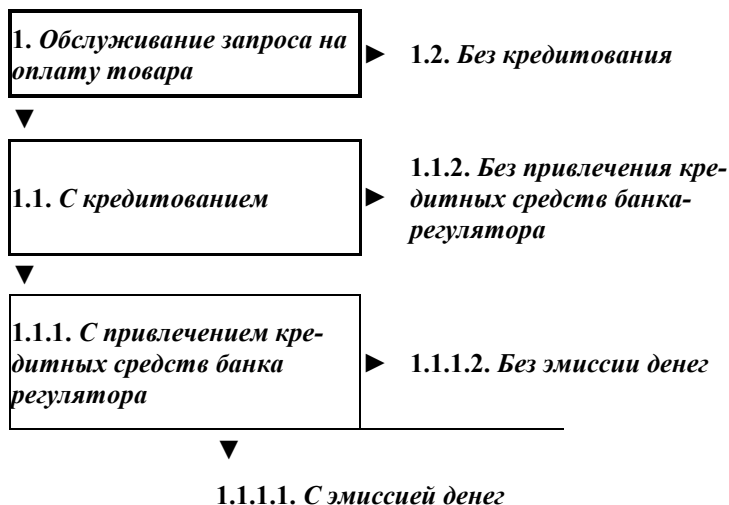


Рис. 3. Оплата товара

Банки-провайдеры перечисляют заёмные суммы на счета клиентов, а затем незамедлительно – на счета поставщиков товаров.

◇Суммы, полученные в результате продажи залогового имущества заёмщиков, нарушивших кредитные договора, поступают на счёта кредиторов (в те разделы, откуда были взяты эти суммы при предоставлении кредитов).◇

◇Государственные налоги и сборы (с определённых законом сделок) уплачиваются автоматически при реализации таких сделок.◇

### 3.2. БАНКОВСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ В НЭК-СИСТЕМЕ

В соответствии с НЭк-моделью вместо нынешней банковской системы целесообразно организовать систему банков-провайдеров, функционирующих под управлением банка-регулятора.

□Банки-провайдеры – это НЭк-субъекты, производящие и поставляющие на рынок товары, представляющие собой уни-

*фицированные банковские сервисы, предназначенные для кредитного, документального, аналитического и юридического обеспечения сделок.*

Эти сервисы включают:

- анализ кредитных запросов субъектов (заёмщиков и потенциальных кредиторов);
- предоставление беспроцентных кредитов под текущие сделки купли – продажи товаров (из собственных средств банка-провайдера; из средств клиентов; из средств, запрошенных у другого банка-провайдера или у банка-регулятора);
- ведение счетов клиентов и выполнение их платёжных поручений;
- анализ инвестиционных запросов клиентов (потенциальных инвесторов и получателей инвестиций);
- реализацию инвестиционных сделок (собственных и по запросам клиентов).

◇Банки могут выполнять заказы получателей инвестиций на консолидацию заявок инвесторов, чтобы получить сумму инвестиции, интересующую её получателя.◇

- регистрацию заключённых договоров (по сделкам) и ведение баз данных таких договоров;
- юридическое сопровождение реализуемых сделок и др.).□

☼В нынешней российской банковской практике заключивший договор о вкладе (по сути – кредитор банка) в обмен на свои деньги получает документ, в котором ничего не говорится об имущественной ответственности банка за невыполнение договорных обязательств. Но, выдавая кредиты, банки всегда тщательно оговаривают в договоре имущественную ответственность своих заёмщиков.☼

◇В НЭк-системе допустимы только беспроцентные кредиты, которые служат средством продвижения товаров и повышения экономического статуса кредитора.◇

☼Кредитуя своих покупателей, продавец имеет возможность увеличить свою долю на рынке. Кредитование покупате-

лей служит одним из инструментов поддержки платёжеспособного спроса на свои товары.☼

◇Размер кредита не может быть больше стоимости оплачиваемого товара (это контролируется на программном уровне).◇

□В НЭк-системе банк-регулятор:

– осуществляет программно реализованную эмиссию денег (правила эмиссии установлены законом);

– выдаёт банкам-провайдерам лицензии на право банковской деятельности и отзывает лицензии;

– контролирует выполнение установленных законом правил банковской деятельности;

– анализирует финансовую составляющую имущественного обмена и представляет результаты анализа в порядке, установленном законом;

– с привлечением банков-провайдеров разрабатывает и тестирует унифицированные формы банковских документов (кредитных, инвестиционных и др.);

– утверждает прошедшие тестирование унифицированные формы банковских документов;

– контролирует эффективность размещения средств денежного государственного резерва и фондов социальной защиты (см. раздел 4.) и др.□

### 3.3. ИНВЕСТИРОВАНИЕ В НЭК-СИСТЕМЕ

В эти дни за игру на фондовых биржах расплачиваются и не участвующие в ней производители товаров. Психозные биржевые потрясения встроены в механизм ныне действующих фондовых бирж. Вызывающие панику сведения могут распространяться и по заказу [их могут выдать и «уважаемые аналитики», и высшие государственные чиновники (зависит от масштаба планируемого биржевого потрясения)]. Скупив упавшие в цене акции, наживающиеся на биржевых потрясениях организуют очередной ажиотаж, теперь уже направленный на резкий рост скупленных ими акций.

В Интернет-эпоху при изобретении модели инвестирования целесообразно предусмотреть защиту инвесторов и получателей

инвестиций от вредоносных последствий централизации, монополизации и подверженности провокационным факторам, вызывающим биржевые потрясения. То есть от того, что в эти дни не только не запрещено, а положено в основу (небольшое число фондовых бирж мирового масштаба, публикуемая динамика индексов, «иконные» курсы, регулярные сообщения о котировках и т.д.).

*В НЭк-системе допустим только фондовый рынок, работающий на основе договоров инвесторов и получателей инвестиций (без вторичных рынков). Недопустимы централизация, сессии и глобальное оповещение. Сервисы инвестиционных сделок предоставляют банки-провайдеры.*

□ *Инвестирование* – вложение денежных средств одного субъекта (инвестора) в производство другого субъекта (получателя инвестиции). Осуществляется на договорной основе (получатель инвестиции гарантирует выполнение договорных условий частью стоимости своего залогового имущества).□

□ *Инвесторы и получатели инвестиций* – субъекты одной и той же НЭк-системы или разных систем.□

Ими могут быть физические и юридические лица (индивидуальные предприниматели, предприятия, банки и т.д.).

□ *Запрос инвестора* – предложение на договорных условиях вложить конкретную сумму денег в производство товаров другого субъекта.□

□ *Запрос получателя инвестиции* – предложение получить инвестицию на договорных условиях.□

☼ Должны существовать унифицированные шаблоны для запросов инвесторов и получателей инвестиций. Оформить запрос должно быть не сложнее, чем заказ в интернет-магазине.☼

Для оповещения потенциальных партнёров инвесторы и получатели инвестиций размещают свои заявки на круглосуточно действующих собственных сайтах и/или сайтах банков-провайдеров, сервисами которых они пользуются. Таким образом, в любой момент сведения об инвестиционных заявках

доступны для всех субъектов, зарегистрированных в данной НЭк-системе.

□ *Инвестиционная сделка – заключение договора между инвестором и получателем инвестиции.* В договоре должны быть указаны уникальные глобальные идентификаторы субъектов, заключивших сделку, и определены условия досрочного прекращения договора (должно быть указано, какой суммой денег ответит нарушивший договор). □

Суммы, поступившие со счетов инвесторов, записываются в подраздел *Получено* раздела *Инвестирование* счёта получателя инвестиций. Из этого раздела могут совершаться только платежи, относящиеся к развитию производства (типы допустимых сделок оговорены в инвестиционных договорах).

◇ *Сведения о совершённых инвестиционных сделках целесообразно защитить законом о коммерческой тайне* (никаких индексов деловой активности и прочего «шума», предназначенного для управления поведением). ◇

### 3.4. ВНЕШНИЙ ОБМЕН ТОВАРАМИ (ЭКСПОРТ/ИМПОРТ)

Обмен товарами между НЭк-системами называют экспортом (для продавца) и импортом (для покупателя). Будем называть такой обмен *внешним*, а совершающийся внутри каждой из систем – *внутренним*. Правила внешнего обмена товарами отличаются от правил внутреннего обмена. Отличия связаны и с тем, что деньги обменивающихся товарами систем (называемые *валютами*) могут иметь неодинаковую товарную ёмкость.

Предположим, что две системы (А и Б) образуют объединённую систему (АБ).

*Внешнеобменные сделки между А и Б должны осуществляться при выполнении следующих условий:*

- 1) применимы деньги только систем, участвующих в сделке;
- 2) выполняются ограничения на перечень товаров, объёмы экспорта и импорта и др., которые определены государственными законами и нормативными актами обеих систем.

◇Ряд товаров может экспортироваться и за валюту системы А, и за валюту системы Б. Другие товары могут экспортироваться только за валюту экспортирующей системы.◇

◇В эти дни немало участников внешнеторговых сделок применяют не валюты своих стран, а доллары США, играющие роль глобальной резервной валюты. Эмитированные в США доллары (не обеспеченные товарами, произведёнными в этой стране) используются не только для импорта товаров в США, но и раздаются в виде кредитов «долларозависимому глобальному контингенту» (который, совершая внешнеторговые сделки с использованием долларов США, обеспечивает эту валюту своими товарами).◇

◇В НЭк-системе сделки внешнего обмена обслуживают банки-провайдеры под контролем банка-регулятора. При этом осуществляется программно-реализованный контроль выполнения условий 1)-2) и автоматически взимаются установленные законом пошлины.◇

◇В настоящее время ВТО и другие межнациональные организации осуществляют глобальное управление внешним обменом между странами, вступившими в такие организации. Целесообразность глобального управления обосновывается ведущими экономистами США [12].◇

В соответствии с НЭк-моделью нецелесообразны глобальные регуляторы, ограничивающие свободу экономического выбора субъектов и не способствующие решению задач развития потенциала своей страны (см. раздел 1.). Каждый субъект внешнего обмена должен иметь возможность заключать договора, действуя в соответствии с приведёнными выше условиями 1)-2). При этом целесообразны отношения координации между странами при выработке и реализации правил контроля исполнения условий 1)-2).

◇Деньги разных НЭк-систем служат документами, сопровождающими внешний имущественный обмен. При совершении любой внешней сделки используются валюты обеих взаимодействующих систем. Поскольку деньги не могут рассматриваться в



отрыве от имущества, стоимость которого удостоверяют, для них валютный обмен не имеет смысла.◇

### 3.5. ИМУЩЕСТВЕННЫЙ СТАТУС В НЭК-СИСТЕМЕ

Основное средство повышения имущественного статуса (НЭК-статуса) – продажа товаров собственного производства.

☼ Бригада инженеров-проектировщиков продаёт выполненные ею проекты, программист – программы, учитель – образовательные услуги и т.д. Стоимость их товаров устанавливается на основе договоров с заказчиками, заключаемых после конкурсного отбора производителя.☼

◇ В нынешней экономической системе можно «жить на процентах», спекулировать кредитами и ценными бумагами. В НЭК-системе это нереализуемо.◇

□ *НЭК-статус* определяется упорядоченным набором денежных сумм из основных разделов счёта субъекта, значения которых отражают результаты его экономической деятельности.□

*Вычислитель НЭК-статуса* реализован программно. Стоит из счётчиков сумм для сделок каждого типа (продажа товаров, покупка товаров и др.). Значения, полученные счётчиками, используются для вычисления ряда обобщающих величин. Важнейшая среди них – сумма в разделе *Располагаю*.

## 4. Сборы на содержание государственного механизма, государственный резерв и фонды социальной защиты

Установленные законом налоговые и другие сборы на содержание государственного механизма должны совершаться автоматически при совершении сделок (на уровне программных составляющих банковских сервисов).

Подача налоговых деклараций теряет смысл, так как все сделки регистрируются и хранятся в соответствующих базах данных банков.

◇Нынешний государственный золотовалютный резерв России уязвим в той мере, в какой неадекватна существующая концепция денег: изменение товарной ёмкости валют и цены золота – вне области допустимого управления держателя резерва, а средства резерва не работают в экономике России.◇

*Денежный государственный резерв лишён дефекта нынешнего золотовалютного резерва.* Если его денежные средства (для России – рублёвые) размещены в виде кредитов и инвестиций НЭк-системы данного государства, то на каждом отрезке времени они гарантированы залоговым имуществом заёмщиков и получателей инвестиций. При этом денежные средства работают в экономике данного государства (делая более доступными и кредиты, и инвестиции).

Чтобы товарные ёмкости денежных средств пенсионных и других фондов социальной защиты менее зависели от неблагоприятных экономических ситуаций, эти средства (так же, как средства денежного государственного резерва) целесообразно размещать в виде банковских кредитов и инвестиций той же системы, где они были порождены и накоплены.

◇Целесообразно запретить законом вывод денежных средств государственного резерва и фондов социальной защиты из НЭк-системы той страны, где они были порождены и аккумулированы.◇

## **5. Социальная значимость реализации НЭк-модели**

Нормализация экономики обеспечивается тем, что:

- правила экономической деятельности ориентированы на решение задач развития потенциала страны;
- повышение НЭк-статуса достижимо только путём производства пользующихся спросом товаров;
- дефицита или избытка денег быть не может;
- двусторонний договор служит правовой основой экономических отношений (договора на производство и поставку товаров; договорное инвестирование и др.);

– беспроцентные кредиты под покупку товаров заинтересованы предлагать и их производители, и продавцы, и те, у кого есть свободные деньги (с ростом общей суммы предоставленных кредитов автоматически растёт рейтинг кредитоспособности кредитора, повышая его НЭк-статус);

– договорное инвестирование (без вторичных рынков ценных бумаг) служит формой долговременного сотрудничества: инвестировать целесообразно не только в крупное производство, но и в индивидуальное производство овощей, фруктов, животноводческой продукции (с оговоренной в инвестиционном договоре возможностью купить эту продукцию дешевле);

– в НЭк-системе нереализуема процветающая в эти дни спекуляция кредитами, валютой и ценными бумагами (которая служит одной из основных причин регулярно наведывающихся кризисов);

– станет труднореализуемым глобальное управление экономическим поведением (посредством МВФ, ВТО и др.).

## **Заключение**

1. Предложена новая экономическая модель (названная моделью нормализованной экономики – НЭк-моделью), ориентированная на развитие потенциала страны, под юрисдикцией которой находятся участники экономической деятельности.

2. В НЭк-модели деньги не являются товаром-посредником, как нынешние деньги. Они служат средством программно реализованного документального представления стоимости товаров и имущественного статуса участников экономических отношений.

3. Деньги эмитируются банком-регулятором только для обслуживания текущих сделок купли – продажи товаров. Не существует способов организовать недостаток или избыток денег.

4. Банковская система, включающая банк-регулятор и банки-провайдеры, функционирует по единым программно реализованным правилам.

5. Допустимы только беспроцентные кредиты под текущие покупки.

6. Разрешено только договорное инвестирование (без анонимных акций и вторичных рынков).

7. Экспорт/импорт реализуется только с применением валют сторон, осуществляющих сделки.

8. Государственный денежный резерв и фонды социальной защиты формируются только в валюте данного государства.

Свободная часть средств государственного резерва и фондов социальной защиты используется для кредитования отечественных заёмщиков и инвестирования в проекты своей страны.

### **Литература**

1. ДОЛАН Э., КЭМПБЕЛЛ К., КЭМПБЕЛЛ Р. *Деньги, банковское дело и денежно-кредитная политика*. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербург Оркестр, 1994. – 448 с.
2. ИЛЬИН А. В. *Конструирование разрешающих структур на задачных графах системы знаний о программируемых задачах* // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2007. – №3. – С. 30-36
3. ИЛЬИН А. В., ИЛЬИН В. Д. *Интерактивный преобразователь ресурсов с изменяемыми правилами поведения* // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2004. – №2. – С. 67-77
4. ИЛЬИН В. Д. *Основания ситуационной информатизации*. – М.: Наука, 1996. – 180 с.
5. ИЛЬИН В. Д. *S-моделирование имущественного обмена*. – М.: ИПИ РАН, 2008. – 80 с.
6. *Модель нормализованной экономики (НЭк-модель)*  
<http://new-economics.ucoz.ru>
7. FISHER I. *The Purchasing Power of Money. Its Determination and Relation to Credit, Interest, and Crises*. – New York: The

Macmillan Co., 1922

<http://www.econlib.org/library/YPDBooks/Fisher/fshPPM.html>

8. FRIEDMAN M. *The Quantity Theory of Money: A restatement*, in M. Friedman, editor, *Studies in the Quantity Theory of Money*. Chicago: University of Chicago Press. Reprinted in Friedman, 1969
9. FRIEDMAN M., BORDO M. *The Optimum Quantity of Money*. Aldine Transaction, 2006 [http://books.google.ru/books?id=u3wexXdHelgC&printsec=frontcover&source=gbs\\_summary\\_r&cad=0](http://books.google.ru/books?id=u3wexXdHelgC&printsec=frontcover&source=gbs_summary_r&cad=0)
10. KEYNES J. *The General Theory of Employment, Interest and Money*. – Macmillan Cambridge University Press, 1936 <http://www.marxists.org/reference/subject/economics/keynes/general-theory/>
11. KRUGMAN P., WELLS R. *Macroeconomics. Chapter 13: Money, Banking, and the Federal Reserve System*. 2005. <http://www.pkarchive.org/>
12. KRUGMAN P., WELLS R. *Macroeconomics. Chapter 18: International Trade*. 2005. <http://www.pkarchive.org/>

## **THE MODEL OF NORMALIZED ECONOMICS (NEC-MODEL): BASICS OF FRAMEWORK**

**Vladimir Ilyin**, Institute of Informatics Problems of RAS, Moscow,  
Doctor of Science, professor (vdilyin@ipiran.ru)

*Abstract: NEc-model focuses on the development of national economy. It is relevant to the modern economic relations and information technologies. Money is treated not as an intermediary good, but as an electronic document that proves the cost of goods and property status of participants of economic relations. The model defines rules for money emission, banking, investing and export/import.*

Keywords: economic model, NEc-model, money, banking, investing, export/import, informatization of economic activity.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии В.В. Клочковым*

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕГИОНАЛЬНЫХ ИНДУСТРИАЛЬНЫХ КЛАСТЕРОВ И ОЦЕНКА ИХ СТРУКТУРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭКОНОМИКУ РЕГИОНА (НА ПРИМЕРЕ ВКО)**

**Турганбаев Е. М.<sup>1</sup>, Козлова М. В.<sup>2</sup>**

*(Восточно-Казахстанский государственный  
технический университет им. Д. Серикбаева,  
г. Усть-Каменогорск, Республика Казахстан)*

*В статье рассмотрены основные подходы к определению понятия «кластер», методы идентификации кластеров. Предложена модель формирования кластеров на региональном уровне, основанная на национальных таблицах «затраты – выпуск». На примере Восточно-Казахстанской области выявлен наиболее перспективный для развития экономики региона горно-металлургический кластер. Проведена оценка структурного воздействия основных сегментов горно-металлургического кластера на экономику ВКО.*

Ключевые слова: кластер, факторный анализ, метод главных компонент, таблицы «затраты – выпуск», мультипликатор.

### **1. Введение**

На современном этапе развития Казахстана одной из наиболее сложных экономических проблем является достижение сбалансированности между тремя основными блоками отраслей промышленности: экспортно-сырьевым, обрабатывающим (потребительским, ориентированным на удовлетворение внут-

---

<sup>1</sup> *Еркен Муксунович Турганбаев, декан факультета информационных технологий и энергетики, кандидат физико-математических наук (ETurganbaev@ektu.kz)*

<sup>2</sup> *Марина Васильевна Козлова, преподаватель (Mara\_Koz@mail.ru)*

ренных потребностей), наукоемким (инновационным, экспорто-ориентированным). Наиболее рациональным решением данной задачи видится развитие несырьевых высокотехнологичных секторов, что позволит снизить зависимость экономики от внешних ценовых факторов, создать новые рабочие места и привлечь в страну иностранные инвестиции. Наиболее оптимальной моделью инновационных реформ на современном этапе развития экономики Казахстана предполагается создание отраслевых кластеров в разных регионах Казахстана. Опыт развитых европейских и азиатских стран подтверждает, что кластерный подход является эффективным инструментом повышения конкурентоспособности экономики страны, стимулирует развитие региональной экономики.

С целью повышения конкурентоспособности ключевых недобывающих секторов экономики в 2004 году в Казахстане при содействии американской консалтинговой компании «J.E. Austin Associates, Inc.» началось осуществление первой кластерной инициативы [4].

В 2005 году Постановлением Правительства Республики Казахстан от 25 июня 2005 года № 633 были сформированы и утверждены планы по созданию и развитию на республиканском уровне 7 пилотных кластеров в приоритетных секторах экономики: туризм, пищевая промышленность, нефтегазовое машиностроение, текстильная промышленность, транспортно-логистические услуги, металлургия, строительные материалы [3].

Применение кластерного подхода наиболее актуально на региональном уровне вследствие необходимости тесного контакта между участниками кластера. В связи с этим важным направлением развития регионального управления на сегодняшний день выступает идентификация региональных промышленных кластеров. В данной статье на основе изучения прогрессивного зарубежного опыта предложена модель формирования региональных кластеров и оценки структурных воздействий сегментов кластера на экономику Восточно-Казахстанской области в целом.



## **2. Понятие «кластер»: эволюционный подход**

Несмотря на то, что термин «кластер» все чаще используется в экономической литературе отечественными и зарубежными авторами, его однозначная и строгая дефиниция так и не выработана. В связи с этим возникает необходимость систематизировать накопленный опыт по изучению кластерной теории и уточнить сущность категории «кластер». Основой данного теоретического обзора является систематизация существующих подходов к определению понятия «кластер», произведенная в работах [16] и [20].

Понятие кластер пришло из математики, и означает группу объектов с близкими свойствами.

Между тем, предпосылки для понимания этой категории как особого явления в экономике начали формироваться в 19-ом столетии с идеями А. Маршалла о «локализованной промышленности» – концентрации специализированных отраслей в отдельных местностях. Важным в экономике локализации А. Маршалла является то, что все формы и виды коммерческой деятельности принадлежат к одному сектору промышленности и близость фирм увеличивает инновационные возможности всех индустрий данной местности [16].

Э. Гувер впоследствии, частично основываясь на принципах Маршалла, объяснил, что концентрация экономического пространства важна для устойчивого успеха каждой фирмы.

Труды Маршалла и Гувера легли в основу экономических теорий регионального развития, появившихся в 50–60-е гг. 20-го века.

Ф. Перру, базируясь на теориях Маршалла и Гувера о вспомогательных отраслях промышленности в индустриальных кластерах, предлагает теорию полюсов роста. Перру делает акцент на инновациях и инвестировании, которые являются движущими силами постиндустриального развития. В теоретической модели Ф. Перру отрасли промышленности являются первичной единицей анализа, они рассматриваются как нечто, существующее в абстрактном экономическом пространстве. В соответствии с ней полюс роста – это набор развивающихся и

расширяющихся отраслей (видов деятельности), территориально размещенных в промышленной зоне и способных вызвать дальнейшее развитие экономической деятельности по всему ареалу своего влияния. Понятию «экономическое развитие» дается следующее определение: это структурное изменение, вызванное ростом новых, «увлекающих» отраслей. Данные отрасли содержат в себе движущую силу экономического развития. Эти отрасли – полюса роста, которые сперва иницируют, а затем распространяют развитие на окружающее пространство [14].

Г. Мюрдаль в модели основной периферии обращается к пространственной концентрации экономической активности и объясняет устойчивый экономический рост географической двойственностью экономической активности.

Мюрдаль подчеркивал факт, что рабочая сила и капитал концентрируются в местах, где они могут получить максимальную доходность на свободном рынке. С помощью эффекта взаимной и кумулятивной обусловленности он объясняет, почему регионы, развивающие преимущественно производство продукции в современных секторах, являются более конкурентоспособными по сравнению с бедными регионами с более традиционными секторами производства. Важным для развития кластерной теории является также введение фактора времени, согласно которому, индустриальные кластеры развиваются и могут быть классифицированы на зарождающиеся, существующие и регрессивные [20].

Р. Вернон в своей теории товарного цикла утверждает, что на местоположение фирм влияет комбинация следующих факторов: рыночный спрос, изменение технологии и стоимость рабочей силы. Согласно данной теории, экономическое развитие состоит в непрерывном процессе создания новых видов продукции [20].

Основной движущей силой экономического развития является инновационный процесс, воплощающийся в форме разработки новых видов продукции. Из точек появления инноваций производство новой продукции распространяется на другие районы экономического пространства, а новый продукт, в ко-

нечном счете, становится стандартизированным. Данный процесс стимулирует экономическое развитие в районах обоих типов (как в зонах инноваций, так и в районах стандартизированного производства), однако характер развития в них различный.

Вернон также подчеркивает, что региональная конкурентоспособность зависит от изменения рыночного спроса, технологии производства, издержек производства, которые подвержены динамическим изменениям. Поэтому индустриальные кластеры по своей природе являются динамичными структурами. Стадии жизненного цикла продукции определяют уровень развития кластера.

У. Айзард и др. [12] ввели понятие «промышленный комплекс». Признавая, что каждое изделие может быть изготовлено многократными действиями, они развили новаторское применение таблиц «затраты – выпуск» для количественного измерения стоимостных преимуществ объединения индустриальной деятельности регионов, которая характеризуется интенсивностью прямых и обратных производственных связей.

Айзард и др. в своих работах по определению географически близких межотраслевых экономических связей ввели концептуальное понятие экономики скопления, связанное со статической коэффициентной моделью Лаунхардта-Вебера.

Параллельно Айзарду и пр., Л. Мозес пересмотрел классическую модель Лаунхардта-Вебера, включив неоклассическую функцию производства в первоначальную классическую модель теории местоположения.

Другим направлением в классическом анализе местоположения было введение моделей, основанных на системе концентрических поясов Й. фон Тюнена. Наиболее значимыми в этом аспекте являются исследования Alonso, Muth, Mills и Evans. Но, несмотря на все концептуальные пересмотры, ни одна из неоклассических моделей местоположения не объясняет, почему экономическая активность группируется в географическом пространстве.

Chinitz [20], основываясь на изучении экономики городов Нью-Йорка и Питсбурга, предложил инкубационную модель, в

соответствии с которой более зрелые города имеют преимущества, действуя как инкубатор по созданию новых фирм, видов коммерческой деятельности и экономических возможностей. Уровень диверсификации индустриальных кластеров обеспечивает условия развития малых и новых фирм, предоставляя большой выбор факторов производства.

Предложенный исторический подход к определению кластера свидетельствует об интенсивности развития терминологического аппарата теории кластерного подхода.

Являясь комплексным и емким понятием «кластер» различными учеными-исследователями определялся [16]:

– как географически близкие группы фирм, специализирующиеся на производстве схожих изделий или оказании услуг (Маршалл, Артур, Sorenson и Audia);

– как географически близкая группа взаимосвязанных отраслей промышленности (Портер);

– как сети фирм (Vecattini) и связанные учреждения в пределах географических границ (Saxenian);

– как группы фирм, использующих одинаковые технологии производства и связанные с другими группами фирм на основе технологии (Tushman и Rosenkopf, Wade,).

### **3. Методы идентификации кластеров**

Систематизировав научные взгляды ученых-экономистов можно выделить три концептуальных подхода к идентификации кластеров:

1) индустриальные кластеры, основанные на теоретических принципах экономики локализации Маршалла и описанных в работах Rosenfeld; Schmitz и Nadvi; Swann и Prevezer [18, 19];

2) определение индустриальных кластеров на основе установления межотраслевых отношений при помощи таблиц «затраты – выпуск». Данный подход встречается в работах Czamanski, O'hUallachain, Redman, Røepke и Bergman и Feser [8, 10, 15, 17];

3) концепции индустриальных кластеров, включающие в себя широкий спектр доказательств: экономика локализации и урба-

низации, внутренний эффект масштаба, цепочка добавленной стоимости, технологические инновации и др., объясняющие объединение учреждений в географическом пространстве и разработанные в работах М. Портера [2].

Согласно первому подходу, под индустриальным кластером понимается регионально ограниченная группа учреждений, принадлежащих одному промышленному сектору.

Rosenfeld определяет кластер как «добровольное, географически ограниченное объединение схожих и связанных друг с другом фирм, способных совместно действовать» [18]. Swann и Prevezzer называют индустриальными кластерами «группы фирм одной отрасли, расположенные в пределах географической области» [19]. Hill и Brennan считают, что индустриальный кластер – это «концентрация конкурентоспособных фирм или учреждений одной отрасли» [11].

При данном подходе для идентификации индустриальных кластеров определяют региональную специализацию региона, используя метод фактора местоположения (*location quotient method*) (Munnich и др., Rex, Botham и др., Peters).

Факторы местоположения, определяющие региональную специализацию через сравнение значений того или иного вида деятельности для территории (области, города, района) со значениями эталонной области (например, национальной экономики), являются простыми для интерпретации, несложными в применении, не требуют больших временных затрат, необходимые данные для анализа являются доступными. Вместе с тем факторы местоположения имеют теоретические недостатки, такие как допущение о самодостаточности эталонного региона, отсутствие взаимных перевозок, равная производительность и потребление региона. Большой фактор местоположения самостоятельно не может определить, состоит ли сектор промышленности из многочисленных фирм и видов коммерческой деятельности различных размеров – индустриальный кластер, или имеет только одно крупное предприятие.

Айзард [12] в своей концепции промышленного комплекса предопределяет второй концептуальный подход к идентификации индустриального кластера. Он расширяет внутриотрасле-

вую концепцию местоположения, основываясь на кластерном анализе, показав, что все фирмы принадлежат к одной отрасли, учитывая межотраслевые связи. Lamtagino и McCann характеризуют этот тип пространственного кластера как «долгосрочные устойчивые и предсказуемые отношения между фирмами в кластере, через вовлечение частых сделок» [13] и подчеркивают концептуальную взаимосвязь модели с классической (Вебер) и неоклассической (Мозес) производственными моделями местоположения. Концепция Айзарда базируется на прямых и обратных связях таблиц «затраты – выпуск», позволяющих формировать кластеры учреждений, взаимосвязанных по производственной стоимостной цепочке и необязательно принадлежащих одной отрасли.

Айзард определил индустриальный комплекс как «набор действий в определенном местоположении, которые взаимосвязаны техническим и производственно [12], Роекке и др. уточнили, что индустриальный комплекс – это «группа отраслей промышленности, которые имеют похожие образцы сделок, а также, включает другие отрасли промышленности, которые являются главными поставщиками или потребителями для них в пределах группы» [17].

Czamanski и Ablas разграничили понятия промышленного комплекса и индустриального кластера: «кластер означает набор отраслей промышленности, экономически связанных потоками товаров и услуг сильнее друг с другом, чем с другими секторами народного хозяйства» [8]. Комплекс был определен как «группа отраслей промышленности, связанных важными потоками товаров и услуг, и занимающих одинаковое местоположение. Таким образом, комплексы подчеркивают пространственный аспект индустриальной концентрации» [8].

В то же самое время использование таблиц «затраты – выпуск» для идентификации индустриальных комплексов/кластеров было подвергнуто критике со стороны Latham III, например, он указал на то, что таблицы «затраты – выпуск» не учитывают пространственного фактора, а потому не могут быть использованы для определения промышленных комплексов.

O'hUallachain [20] пересмотрел возможность использования

таблиц «затраты – выпуск» для идентификации индустриальных кластеров. O’Hullachain разграничил вертикальные связи – последовательные связи в производственной цепи – и дополнительные связи, возникающие в результате экономии на масштабе, внешние по отношению к фирме, но внутренние для отрасли.

Позднее анализ индустриальных кластеров, основывающийся на таблицах «затраты – выпуск», становится более популярным; так, он использовался, например, в работах Bergman и Feser, Doeringer и Terkla и Hill и Brennan, Feser и Lugar, где было предложено следующее понятие регионального кластера: «концентрация видов коммерческой деятельности, связанных торговыми отношениями (покупатель – поставщик) и/или совместно использующих общие посреднические рынки (включая инфраструктуру, ресурсы знаний, и рабочую силу) и/или общие товарные рынки» [9]. Данное определение отражает оба отношения, описанные O’Hullachain: прямые связи цепочки стоимостей и дополнительные отношения.

Второй подход к идентификации кластеров предполагает изучение межотраслевых связей с использованием таблиц «затраты – выпуск». Основными методами, применяемыми при использовании таблиц «затраты – выпуск», являются прямой анализ взаимосвязей в цепочке ценностей (*direct value chain linkage analysis*) и анализ образцов продаж (*trading pattern analysis*).

Прямой анализ взаимосвязей в цепочке ценностей группирует отрасли промышленности в кластеры на основе взаимосвязей в вертикальной продуктовой цепочке. Основным критерием является то, что отрасли промышленности с сильными транзакционными связями – выше требуемого пороговой уровня, – группируются в индустриальные кластеры (Botham и др.). Следующим шагом является определение совместно расположенных отраслей с помощью сепаративного анализа местоположения (*separate locational analysis*).

Latham III [20] предложил интегрировать анализ местоположения с вычислением парных коэффициентов корреляции для каждой пары отраслей промышленности (на примере 377 регионов США). Совместно расположенными компании признаются в

случае, если парные коэффициенты корреляции для отраслей выше заданного порогового уровня. Далее автор изучает таблицы «затраты – выпуск» на наличие в этих предварительно отобранных отраслях межотраслевых торговых связей со значениями выше средних. Сильные межотраслевые связи в данном случае свидетельствуют о пространственной концентрации отраслей со значительной торговой активностью.

Хотя прямой метод стоимостной цепочки дает полную картину межотраслевых связей для географического региона, в то же время он имеет и ряд существенных недостатков:

1) результаты, получаемые при использовании прямого метода цепочки стоимостей, очень чувствительны к задаваемым пороговым значениям. Среди ученых нет единой точки зрения по поводу определения пороговых значений, и их выбор осуществляется аналитиком самостоятельно;

2) несоответствие географических масштабов для анализа местоположения и анализа межотраслевых связей может привести к неверной интерпретации полученных данных.

При осуществлении прямого анализа цепочки ценностей часто используется теория графов, которая позволяет визуализировать прямые связи в цепочке стоимостей, заложенной в таблицах «затраты – выпуск». Отправной точкой анализа является преобразование матрицы «затраты – выпуск» в трансформационную таблицу, состоящую из 1 и 0. Если ячейка трансформационной таблицы выше заданного порогового значения, то ей присваивается значение «1», иначе – «0». Далее определяют существенные межотраслевые связи матрицы сходства, где в качестве узлов выступают – отрасли промышленности, а соединителей – товаропотоки между ними.

Группы отраслей, формирующих набор взаимно пересекаемых точек, определяются как устойчивые компоненты (Campbell [20]). Результаты, получаемые при использовании теории графов, зависят от используемых задаваемых пороговых значений.

При группировке отраслей промышленности в соответствии со схожестью их товарных образцов применяется два основных метода: статистический кластерный и дискриминантный анализ



и факторный анализ методом главных компонент.

Статистический кластерный и дискриминантный анализ – это методы многомерного статистического анализа, позволяющие группировать промышленные отрасли на основе расчета общей дисперсии по данным таблиц «затраты – выпуск» (Hill и Brennan, Rey [11]).

Главный принцип в данном случае – идентификация схожих отраслей промышленности на основе образцов их продаж и покупок.

Статистический кластерный анализ сортирует отрасли по значению статистической вариации, рассчитанному между парами отраслей таблиц «затраты – выпуск». На следующем этапе при помощи дискриминантного анализа проверяется достоверность этих первоначальных кластеров с использованием тест-статистических показателей. В заключение, используя информацию о специализации региона, мультипликативных эффектах, экспортной активности и темпах роста промышленности, определяется ведущая отрасль кластера (Hill и Brennan).

Данный подход имеет в большей степени теоретическую значимость, потому что получаемые индустриальные кластеры являются взаимоисключающими, так как одна отрасль может относиться только к одному кластеру. Однако опыт показывает, что это не всегда так, например, вспомогательные отрасли (оптовая торговля, транспортировка грузов, складирование) обслуживают многие отрасли промышленности одновременно, а потому они могут входить в состав нескольких индустриальных кластеров.

Факторный анализ методом главных компонент (РСА) – факторный аналитический метод снижения размерности данных, является наиболее применяемым методом определения индустриальных кластеров с использованием данных таблиц «затраты – выпуск». Введен в практику в 1970-х гг., широко использовался такими учеными, как Czamanski, Rourke и др., и критикуемый – например, Latham III. В последнее время вновь приобрел большую популярность и встречается в работах Bergman и Feser [10], Feser и Sweeney, и Patton. Использование РСА позволяет преодолевать ограничения статистического

кластерного и дискриминантного анализа, так как в данном случае сектор промышленности может являться составной частью нескольких кластеров одновременно.

В общем виде факторный анализ методом главных компонент сводит коррелирующие переменные – колонки векторов в матрице – к меньшему числу концептуально значимых величин – факторов. Цель состоит в том, чтобы получить небольшое количество скрытых факторов, которые объясняют наблюдаемые взаимосвязи между переменными (т. е. отраслями промышленности), используя в качестве критерия максимум общей вариации между переменными и фактором.

Применение PCA к структуре «затраты – выпуск» означает сокращение числа отраслей промышленности к меньшему набору индустриальных кластеров, которые наиболее полно объясняют наблюдаемые связи между переменными таблицы «затраты – выпуск». Другими словами, например, вместо того, чтобы изучать межотраслевые сделки в таблице «затраты – выпуск» размерностью  $400 \times 400$ , получают приведенную таблицу, содержащую 15 «латентных», скрытых факторов, объясняющих 80-90% первоначальных межотраслевых связей в таблице «затраты – выпуск».

Роерке и др. [17] использовали первоначальную транзакционную матрицу для группировки отраслей в факторы, исходя из подобия образцов закупок, и назвали этот подход анализом R-способом. В качестве альтернативы авторы идентифицировали подобия образцов продаж среди отраслей промышленности, используя транспонированную транзакционную матрицу с применением анализа Q-способом. В любом случае отрасли промышленности с самыми высокими факторными нагрузками, т. е. самыми высокими корреляциями отрасли с кластером, определяются как основные (первичные) отрасли промышленности, а отрасли с более низкими нагрузками – как вторичные отрасли промышленности.

Czamanski [8] предложил альтернативный вариант PCA для объяснения межотраслевых связей, которые не учитываются Q-способом или R-способом. Вначале транзакционная и транспонированная транзакционная таблицы нормализуются делением

значения каждой ячейки на итог соответствующей колонки. Затем нормализованные транзакционная и транспонированная транзакционная таблицы коррелируются между собой. Симметричная межкорреляционная матрица, полученная выбором наибольших коэффициентов корреляции из четырех результирующих симметричных субматриц, в свою очередь подвергается факторному анализу методом главных компонент.

Независимо от того, какая матрица данных используется в РСА для идентификации межотраслевых отношений, нет гарантии географической близости отраслей промышленности друг к другу, особенно при использовании национальных таблиц «затраты – выпуск». Кроме того, все методы, использующие таблицы «затраты – выпуск», могут быть неточными при использовании агрегированных таблиц «затраты – выпуск» с ограниченным числом отраслей промышленности.

Третья кластерная концепция связана с именем М. Портера и его «Алмазом преимуществ» [2]. Описанные выше концепции индустриальных кластеров ограничены определенными экономическими теориями скопления, например, экономика локализации Маршалла и индустриальный комплекс Айзарда.

Портер расширил понятие индустриальных кластеров, определяя их как «географическую концентрацию связанных компаний и учреждений, действующих в определенной сфере» [2]. Кластеры охватывают множество связанных отраслей промышленности и других объектов, взаимно способствующих росту конкурентоспособности друг друга. Они включают, например, компании, специализирующиеся на поставках определённого типа продукции, машин, обслуживающих организации.

Кластеры также часто включают фирмы, работающие в низовых отраслях (т. е. с каналами сбыта или с потребителями); производителей побочных продуктов; специализированных провайдеров инфраструктуры; правительственные и другие организации, обеспечивающие специальное обучение, сбор информации, проведение исследований и предоставляющие техническую поддержку (такие как университеты, курсы повышения квалификации и т. п.); а также агентства, устанавливающие стандарты. Наконец, многие кластеры включают торговые

ассоциации и другие совместные структуры частного сектора, поддерживающие членов кластера.

Уникальность подхода М. Портера заключается в его деловой философии конкуренции, а не конкурентоспособности местоположения. Однако кластерная концепция Портера носит скорее интуитивный характер.

Портер полагает, что пространственная близость учреждений создает благоприятную экономическую среду для развития конкурентоспособности и внедрения инноваций, повышающую производительность и стимулирующую экономический рост через трансферт технологий и информации. «Алмаз преимуществ» Портера определяет четыре группы факторов, влияющих на конкурентоспособность [2]:

1) стратегия, структура фирм и конкуренция – динамические условия и прямые конкурентные инициативы, влияющие на внедрение инноваций и вызывающие непрерывный рост производительности;

2) условия факторов производства, их качества и степени специализации, включая квалифицированную рабочую силу, капитал и инфраструктуру;

3) изменяющиеся условия спроса, такие как рост разнообразия изделия, снижение их стоимости; побуждающие фирмы к инвестированию и внедрению инноваций;

4) географическая близость низовых и верхних обслуживающих и сопутствующих секторов способствует обмену информацией, идеями и инновациями.

Хоть кластеры Портером недостаточно четко определены, похожие кластерные концепции встречаются у Redman, Hill и Brennan. Так, Redman определяет индустриальный кластер как «явную географическую концентрацию цепей производства одного изделия или набора подобных изделий, а также связанных учреждений, воздействующих на конкурентоспособность этой концентрации (например, образование, инфраструктура и исследовательские программы)» [15].

Hill и Brennan характеризуют конкурентоспособный индустриальный кластер «как географическую концентрацию конкурентоспособных фирм или учреждений одного сектора, а также

имеющих тесные отношения типа «продавец – покупатель» с другими отраслями региона; использующих общую технологию или входящих в состав специализированного трудового объединения, обеспечивающих фирмам конкурентные преимущества перед такими же отраслями других регионов» [11].

В целом комплексные концепции кластеров, представленные Портером, Redman, Hill и Brennan, могут служить инструкцией по содействию экономическому развитию, но в то же время концепции не предлагают методологии, позволяющей практически применить предлагаемые концепции.

#### **4. Модель идентификации региональных индустриальных кластеров**

Анализ существующих методов идентификации кластеров показал, что наиболее точную и полную информацию о существующих взаимосвязях отраслей можно получить, используя факторный анализ методом главных компонент данных, представленных в таблицах «затраты – выпуск».

В данной работе для идентификации региональных кластеров использована методика, предложенная в [10].

Для выявления отраслей, которые составят основу региональных индустриальных кластеров, важно идентифицировать наиболее тесные взаимосвязи между индустриями независимо от их местоположения. Для этих целей в качестве базы построения модели предполагается использование национальных таблиц «затраты – выпуск».

Данные таблиц «затраты – выпуск» позволяют получить характеристику взаимосвязей между отраслями-производителями товаров и услуг и отраслями-потребителями (без учета влияния транспортных, торгово-посреднических наценок и чистых налогов на продукты), выявить зависимость отечественного производства и потребления от внешнего рынка. Симметричная таблица «затраты – выпуск» устанавливает связи типа «продукт – продукт», т. е. по графам и строкам симметричной таблицы используется одинаковая классификация. В столбцах таблицы приводятся данные о потреблении отрасли от

других отраслей, в строках – о спросе других отраслей на выпускаемую отраслью продукцию.

В основе построения таблиц «затраты – выпуск» заложена модель межотраслевого баланса, называемая моделью Леонтьева, которую можно записать в следующем виде:

$$(1) X = AX + Y,$$

где

$$X = \begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_i \end{pmatrix} \text{ – вектор валового выпуска;}$$

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \cdots & a_{ij} \end{pmatrix} \text{ – матрица прямых затрат;}$$

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_i \end{pmatrix} \text{ – вектор конечного потребления.}$$

Коэффициенты прямых затрат  $a_{ij}$  показывают, сколько единиц продукции  $i$ -ой отрасли затрачивается на производство одной единицы продукции в отрасли  $j$ . Считают, что сложившаяся технология производства во всех отраслях является неизменной (за рассматриваемый период времени), а следовательно, коэффициенты прямых затрат  $a_{ij}$  постоянны. Допущение устойчивости отраслевой технологии производства, заложенное в модели Леонтьева и используемое при составлении национальных таблиц «затраты – выпуск», позволяет использовать результаты, полученные при анализе республиканских таблиц «затраты – выпуск» и на региональном уровне.

Имея значения общих промежуточных покупок ( $p$ ) и продаж ( $s$ ) по каждой отрасли, можно выразить функциональную зависимость между двумя любыми отраслями  $i$  и  $j$  при помощи четырех коэффициентов; для каждой индустрии:

$$(2) \quad x_{ij} = \frac{a_{ij}}{p_j},$$

$$(3) \quad x_{ji} = \frac{a_{ji}}{p_i},$$

$$(4) \quad y_{ij} = \frac{a_{ij}}{s_i},$$

$$(5) \quad y_{ji} = \frac{a_{ji}}{s_j}.$$

Каждый из коэффициентов (2)-(5) является индикатором зависимости между отраслями  $i$  и  $j$  в терминах тесно связанных покупок и продаж:

$x_{ij}, x_{ji}$  – удельный вес промежуточных покупок  $j(i)$  от  $i(j)$  в общих промежуточных покупках товаров и услуг. Высокое значение данного коэффициента означает, что индустрия  $j$  зависит от индустрии  $i$  как основного источника его общих промежуточных затрат;

$y_{ij}, y_{ji}$  – удельный вес промежуточных продаж  $i(j)$  для  $j(i)$  в общих промежуточных продажах товаров и услуг. Высокое значение данного коэффициента означает, что индустрия  $i$  зависит от индустрии  $j$  как основного рынка сбыта.

Рассчитанные коэффициенты  $x_{ij}, x_{ji}$  сводятся в матрицу  $X$ , а коэффициенты  $y_{ij}, y_{ji}$  – в матрицу  $Y$ .

Каждая колонка ( $x$ ) матрицы  $X$  является образцом промежуточных входных покупок индустрии, расположенной в колонках. Каждая колонка ( $y$ ) матрицы  $Y$  является образцом промежуточных выходных продаж индустрии, расположенной в колонках.

Оценить взаимосвязь между каждой парой индустрий, базируясь на их общих образцах продаж и покупок между множеством отраслей, возможно при помощи корреляционного анализа.

Так, Фезер и Бергман в работе [10] предлагают рассчитать четыре коэффициента корреляции по данным матриц  $X$  и  $Y$ , с помощью которых возможно выявить схожесть структуры

таблицы «затраты – выпуск» между двумя индустриями  $l$  и  $m$ :

$r(x_l, x_m)$  – измеряет степень схожести образцов входных покупок индустрий  $l$  и  $m$ ;

$r(y_l, y_m)$  – измеряет степень, с которой  $l$  и  $m$  обладают образцами схожей выходной продукцией, т. е. степень схожести продаж товаров смешанным промежуточным выходным покупателям;

$r(x_l, y_m)$  – измеряет степень схожести образцов закупок индустрии  $l$  с образцами продаж индустрии  $m$ , т. е. степень, с которой индустрия  $l$  производит покупки от отраслей, для которых  $m$  является продавцом;

$r(y_l, x_m)$  – измеряет степень схожести образцов закупок индустрии  $m$  с образцами продаж индустрии  $l$ , т. е. степень, с которой индустрия  $m$  производит покупки от отраслей, для которых  $l$  является продавцом.

При расчете коэффициентов корреляции учитываются только производящие отрасли с целью исключения влияния непродуцирующих отраслей (как технологически несхожих), на результаты анализа. К тому же отрасли сферы услуг связаны практически со всеми производящими отраслями.

По итогам расчета коэффициентов корреляции путем выбора наибольшего из четырех коэффициентов корреляции для каждой пары индустрий строится симметричная матрица  $L\nu$ . Каждая колонка матрицы  $L\nu$  представляет собой образец взаимосвязи между индустрией, расположенной в колонке и всеми остальными производящими отраслями. Меры прямой и косвенной межотраслевой связи, рассчитанные для каждой отрасли экономики и представленные в матрице  $L\nu$ , рассматриваются как переменные для факторного анализа.

Как уже отмечалось выше, факторный анализ – это метод многомерного статистического анализа, позволяющий на основе экспериментального наблюдения признаков объекта выделить группу переменных, определяющих корреляционную взаимосвязь между признаками. Факторный анализ – это процедура, с помощью которой большое число переменных, относящихся к имеющимся наблюдениям, сводят к меньшему количеству независимых влияющих величин, называемых факторами. При



этом в один фактор объединяются переменные, сильно коррелирующие между собой. Переменные из разных факторов слабо коррелируют между собой. Таким образом, целью факторного анализа является нахождение таких комплексных факторов, которые как можно более полно объясняют наблюдаемые связи между переменными, имеющимися в наличии.

На первом шаге процедуры факторного анализа происходит стандартизация заданных значений переменных ( $z$ -преобразование); затем при помощи стандартизированных значений рассчитывают корреляционные коэффициенты Пирсона ( $r$ ) между рассматриваемыми переменными:

$$(6) \quad r = \frac{n \times (\sum X \times Y) - (\sum X) \times (\sum Y)}{\sqrt{[n \times \sum X^2 - (\sum X)^2] \times [n \times \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}}$$

Исходным элементом для дальнейших расчётов является корреляционная матрица. Для построенной корреляционной матрицы определяются так называемые собственные значения и соответствующие им собственные векторы, для нахождения которых используются оценочные значения диагональных элементов матрицы (так называемые относительные дисперсии простых факторов). Собственные значения дисперсии сортируются в порядке убывания, для чего обычно отбирается столько факторов, сколько имеется собственных значений, превосходящих по величине 1. Собственные векторы, соответствующие этим собственным значениям, образуют факторы ( $F$ ); элементы собственных векторов получили название факторной нагрузки ( $S$ ). Их можно понимать как коэффициенты корреляции между соответствующими переменными ( $X$ ) и факторами ( $F$ ).

Для решения задачи определения факторов были разработаны многочисленные методы, наиболее часто употребляемым из которых является метод определения главных компонент, который был предложен Пирсоном в 1901 г. и затем детально разработан Хоттелингом.

Описанные выше шаги расчёта ещё не дают однозначного решения задачи определения факторов. Основываясь на геометрическом представлении рассматриваемой задачи, поиск однозначного решения называют задачей вращения факторов. В

данном случае также имеется большое количество методов, наиболее часто употребляемым из которых является ортогональное вращение по так называемому методу варимакса (вращение, максимизирующее дисперсию «новой» переменной (фактора) и минимизирующее разброс вокруг неё). Факторные нагрузки повернутой матрицы могут рассматриваться как результат выполнения процедуры факторного анализа. Кроме того, на основании значений этих нагрузок необходимо попытаться дать толкование отдельным факторам.

Каждый получаемый на основе анализа таблиц «затраты – выпуск» кластер состоит из набора первичных и вторичных отраслей.

Первичные отрасли промышленности для данной группы – те сектора, которые достигли максимальной факторной нагрузки на данном факторе и значение которой равно 0,6 или выше. Вторичные отрасли промышленности для данной группы – те сектора, которые достигли факторной нагрузки в кластере больше 0,35, но меньше 0,6.

## **5. Идентификация индустриальных кластеров Восточно-Казахстанской области**

В данном разделе на основе описанной методологии определения кластеров предпринята попытка идентификации региональных кластеров для Восточно-Казахстанской области. Для этих целей в качестве базы построения модели предполагается использование таблицы «затраты – выпуск» Республики Казахстан за 2006 год, включающей 30 производящих и обслуживающих отраслей. Для расчетов использовались данные о промежуточном потреблении 20 производящих индустрий.

В таблице 1 приведена матрица  $L_v$ , данные которой были использованы для проведения факторного анализа методом главных компонент с использованием варимакс-вращения. Расчеты произведены с помощью пакета прикладного статистического анализа SPSS [1]. Корреляционная матрица показана в таблице 2, а расчет значения объясненной суммарной дисперсии приведен в таблице 3.

Таблица 1. Матрица Lv

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1	0,061	0,4633	-0,0931	0,0414	0,3065	0,85942	0,44844	-0,0486	-0,0428	0,0054	0,4218	0,173	-0,0164	0,0219	0,05808	0,1124	0,03134	-0,0241	-0,03277
2	0,061	1	0,0282	-0,0809	-0,077	-0,0559	0,24703	-0,0513	-0,0538	-0,0570	-0,0449	-0,1007	-0,0486	-0,0586	-0,0973	-0,10417	-0,0847	-0,09203	-0,022	-0,0938
3	0,4633	0,0282	1	-0,0827	0,6934	0,3102	0,40397	0,06358	-0,0853	0,00583	-0,0211	0,2451	0,24135	0,0338	-0,0949	0,5189	0,2677	0,56336	0,5579	0,05955
4	-0,0894	-0,0951	0,3162	1	0,15873	0,1208	-0,0695	-0,0422	-0,0247	-0,0661	0,0169	0,9678	0,3185	0,3264	0,9223	0,0705	0,2641	0,1404	0,5196	0,9892
5	0,0414	-0,077	0,6934	-0,0218	1	0,1326	-0,0447	-0,009	-0,0199	0,15474	-0,0396	0,1175	0,28607	0,0743	0,00989	0,9722	0,36812	0,96459	0,0023	0,2025
6	0,3065	-0,0559	0,3102	0,1208	0,1326	1	0,06591	0,04538	-0,0671	-0,0312	0,3295	0,1788	0,0691	-0,0799	0,7693	0,0953	0,1746	0,0849	0,167	0,64264
7	0,7597	0,2245	0,3974	-0,0695	-0,0447	0,03901	1	0,1798	-0,0146	-0,0204	0,003	0,1011	0,12565	0,1177	-0,0825	-0,03124	-0,0061	-0,0357	-0,0562	-0,0671
8	0,3619	-0,0245	-0,0915	-0,0198	-0,009	-0,0875	0,1798	1	0,09778	-0,0727	-0,0499	-0,0415	-0,0807	0,03961	-0,0501	-0,03178	-0,06673	0,07406	-0,0857	-0,0368
9	-0,0844	-0,0479	-0,0748	0,00381	-0,0601	-0,0742	-0,0484	0,0441	1	-0,0585	-0,0339	-0,0271	-0,0872	-0,0735	-0,0425	-0,0535	-0,05579	0,85011	-0,0317	-0,0201
10	-0,0428	-0,0542	0,15755	-0,0564	0,0871	-0,0669	-0,0204	-0,0646	-0,0529	1	-0,0568	-0,078	-0,0657	-0,0465	0,0851	0,0998	-0,0086	0,1673	-0,1016	0,0033
11	0,0054	-0,0314	0,064	0,0169	0,02144	0,3295	0,003	-0,0808	-0,053	-0,0529	1	-0,0566	-0,0656	-0,0298	0,4317	0,0123	0,0463	0,0594	-0,0625	0,19085
12	0,56185	0,04827	0,2451	0,9678	0,43013	0,1788	0,22847	0,15241	-0,105	-0,0864	-0,0566	1	0,2653	0,0561	0,9049	0,61826	0,1249	0,04	0,5698	0,9383
13	0,1919	-0,0368	0,1384	0,35729	0,2775	0,0691	0,07904	0,00365	-0,0539	-0,0406	-0,0134	0,30251	1	0,52891	0,27961	0,2633	0,0889	0,2429	0,0761	0,3254
14	-0,0164	0,04903	0,05549	0,37641	0,21815	-0,0464	0,1177	-0,0399	-0,0678	-0,0464	-0,0493	0,32235	0,4123	1	0,2888	0,03587	0,0352	0,0714	0,0838	0,33
15	0,0219	-0,1068	0,03695	0,9223	0,0005	0,7693	-0,0825	-0,0928	0,10005	0,6605	0,4317	0,9049	-0,0556	-0,0108	1	0,1713	0,2196	0,1878	0,4546	0,9548
16	0,0349	-0,1283	0,5189	0,09574	0,9722	0,0953	-0,0494	-0,039	-0,0535	0,0998	0,0123	0,15088	0,2633	0,0194	0,1713	1	0,60561	0,92823	-0,0105	0,30541
17	0,1196	-0,0189	0,2677	0,2641	0,328	0,1746	0,0334	-0,0342	-0,1011	-0,0086	0,0463	0,19633	0,0889	0,0352	0,2196	0,317	1	0,869	0,1806	0,3172
18	-0,0535	-0,0902	0,2182	0,1404	0,7572	0,0849	-0,0761	-0,0489	0,0134	0,1673	0,0594	0,06223	0,2429	0,0714	0,1878	0,8581	0,97358	1	0,0092	0,1922
19	0,05739	0,24846	0,5324	0,5183	0,0023	0,36777	-0,0393	-0,0534	-0,0706	-0,0778	-0,0103	0,5698	0,06008	-0,0286	0,4546	-0,0621	0,1293	-0,0298	1	0,4618
20	-0,0536	-0,0938	-0,0342	0,9892	0,124	0,1885	-0,0671	-0,0368	-0,0201	0,0033	0,0676	0,9383	0,3254	0,33	0,9548	0,1551	0,3172	0,1922	0,4961	1

## Управление большими системами. Выпуск 25

Таблица 2. Корреляционная матрица

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	1,0000	0,1459	0,3827	-0,2974	-0,1349	0,0846	0,8980	0,4599	-0,2360	-0,1913	-0,1624	0,0465	-0,0830	-0,2261	-0,3351	-0,1954	-0,1569	-0,3127	-0,1082	-0,3508
2	0,1459	1,0000	-0,0767	-0,3484	-0,2793	-0,2486	0,3733	0,0033	-0,1211	-0,1174	-0,1373	-0,2477	-0,2795	-0,1474	-0,3777	-0,3452	-0,2854	-0,3407	-0,0049	-0,3703
3	0,3827	-0,0767	1,0000	-0,1767	0,6899	0,0181	0,3036	-0,1074	-0,0898	-0,0048	-0,2302	0,0170	0,0413	-0,1952	-0,3677	0,5893	0,3639	0,3959	0,1525	-0,3096
4	-0,2974	-0,3484	-0,1767	1,0000	-0,0982	0,3718	-0,3945	-0,3400	-0,1778	-0,2046	0,0515	0,8193	0,4119	0,5073	0,7422	0,0213	0,2105	-0,0126	0,6953	0,9711
5	-0,1349	-0,2793	0,6899	-0,0982	1,0000	-0,0689	-0,2151	-0,2047	0,1509	0,2191	-0,1443	-0,0068	0,2054	-0,0609	-0,2274	0,9690	0,5881	0,8471	-0,2123	-0,1443
6	0,0846	-0,2486	0,0181	0,3718	-0,0689	1,0000	-0,1262	-0,2105	-0,2573	-0,1571	0,5540	0,3830	-0,0231	-0,1187	0,6032	0,0004	0,1314	-0,0634	0,4118	0,3829
7	0,8980	0,3733	0,3036	-0,3945	-0,2151	-0,1262	1,0000	0,3421	-0,2020	-0,1382	-0,1877	-0,1126	-0,0919	-0,1101	-0,4845	-0,2956	-0,2679	-0,3911	-0,1980	-0,4567
8	0,4599	0,0033	-0,1074	-0,3400	-0,2047	-0,2105	0,3421	1,0000	0,1061	-0,1674	-0,2237	-0,1348	-0,2135	-0,1952	-0,3878	-0,2415	-0,2462	-0,2534	-0,3533	-0,3230
9	-0,2360	-0,1211	-0,0898	-0,1778	0,1509	-0,2573	-0,2020	0,1061	1,0000	-0,0107	-0,1174	-0,3314	-0,1969	-0,2263	-0,1287	0,1186	0,1523	0,2019	-0,2681	-0,1547
10	-0,1913	-0,1174	-0,0048	-0,2046	0,2191	-0,1571	-0,1382	-0,1674	-0,0107	1,0000	-0,1081	-0,2558	-0,2110	-0,2066	0,1543	0,1720	-0,0058	0,1784	-0,2587	-0,1938
11	-0,1624	-0,1373	-0,2302	0,0515	-0,1443	0,5540	-0,1877	-0,2237	-0,1174	-0,1081	1,0000	-0,0567	-0,1849	-0,1664	0,3471	-0,0752	-0,0038	-0,0526	-0,0027	0,0890
12	0,0465	-0,2477	0,0170	0,8193	-0,0068	0,3830	-0,1126	-0,1348	-0,3314	-0,2558	-0,0567	1,0000	0,3377	0,2912	0,6065	0,1055	0,1156	-0,0236	0,6062	0,8143
13	-0,0830	-0,2795	0,0413	0,4119	0,2054	-0,0231	-0,0919	-0,2135	-0,1969	-0,2110	-0,1849	0,3377	1,0000	0,7088	-0,0132	0,2254	0,0914	0,1651	0,0193	0,4111
14	-0,2261	-0,1474	-0,1952	0,5073	-0,0609	-0,1187	-0,1101	-0,1952	-0,2263	-0,2066	-0,1664	0,2912	0,7088	1,0000	0,0806	-0,0418	-0,0450	-0,0564	0,0984	0,4976
15	-0,3351	-0,3777	-0,3677	0,7422	-0,2274	0,6032	-0,4845	-0,3878	-0,1287	0,1543	0,3471	0,6065	-0,0132	0,0806	1,0000	-0,1064	0,1029	-0,0819	0,5525	0,7952
16	-0,1954	-0,3452	0,5893	0,0213	0,9690	0,0004	-0,2956	-0,2415	0,1186	0,1720	-0,0752	0,1055	0,2254	-0,0418	-0,1064	1,0000	0,7113	0,9295	-0,1817	0,0052
17	-0,1569	-0,2854	0,3639	0,2105	0,5881	0,1314	-0,2679	-0,2462	0,1523	-0,0058	-0,0038	0,1156	0,0914	-0,0450	0,1029	0,7113	1,0000	0,8452	0,0726	0,2264
18	-0,3127	-0,3407	0,3959	-0,0126	0,8471	-0,0634	-0,3911	-0,2534	0,2019	0,1784	-0,0526	-0,0236	0,1651	-0,0564	-0,0819	0,9295	0,8452	1,0000	-0,2462	0,0223
19	-0,1082	-0,0049	0,1525	0,6953	-0,2123	0,4118	-0,1980	-0,3533	-0,2681	-0,2587	-0,0027	0,6062	0,0193	0,0984	0,5525	-0,1817	0,0726	-0,2462	1,0000	0,6101
20	-0,3508	-0,3703	-0,3096	0,9711	-0,1443	0,3829	-0,4567	-0,3230	-0,1547	-0,1938	0,0890	0,8143	0,4111	0,4976	0,7952	0,0052	0,2264	0,0223	0,6101	1,0000

## Управление в социально-экономических системах

Данные таблицы 3 позволяют сделать следующие выводы: семь собственных факторов имеют значения, превосходящие 1. Следовательно, для анализа отобрано только семь факторов, которые объясняют 88% дисперсии в матрице данных. Первый фактор объясняет 21,328% суммарной дисперсии, второй фактор – 20,783%, третий фактор – 13,606%, четвертый – 10,681%, пятый – 9,126%, шестой – 3,278% и седьмой – 6,161%.

Таблица 3. Объяснённая суммарная дисперсия

Компоненты	Первичные собственные значения			Повёрнутые суммы квадратов нагрузок		
	Сумма	% дисперсии	Совокупный %	Сумма	% дисперсии	Совокупный %
1	5,317	26,586	26,586	4,266	21,328	21,328
2	4,291	21,457	48,043	4,157	20,783	42,111
3	2,419	12,094	60,137	2,721	13,606	55,718
4	2,047	10,234	70,371	2,136	10,681	66,399
5	1,259	6,296	76,667	1,825	9,126	75,526
6	1,184	5,920	82,587	1,256	6,278	81,804
7	1,075	5,377	87,964	1,232	6,161	87,964
8	0,636	3,181	91,146			
9	0,557	2,785	93,931			
10	0,405	2,027	95,958			
11	0,304	1,520	97,479			
12	0,243	1,213	98,692			
13	0,157	0,786	99,478			
14	0,045	0,227	99,705			
15	0,032	0,162	99,867			
16	0,017	0,083	99,950			
17	0,006	0,032	99,982			
18	0,003	0,016	99,998			
19	0,000	0,002	100,000			
20	0,000	0,000	100,000			

В таблице 4 представлена повёрнутая матрица компонентов факторного анализа.

Таблица 4. Повёрнутая матрица компонентов<sup>1, 2, 3</sup>

Наименование отрасли	Компоненты						
	1	2	3	4	5	6	7
1. Сельское хозяйство, охота и лесоводство	0,083	-0,105	0,933	-0,112	-0,016	0,159	0,107
2. Рыболовство, рыбоводство	-0,288	-0,344	0,136	-0,186	-0,223	-0,661	0,203
3. Добыча угля и лигнита, разработка торфа	-0,012	0,698	0,546	-0,114	-0,119	-0,245	0,01
4. Добыча сырой нефти и природного газа	0,893	0,006	-0,223	0,322	0,052	0,026	0,076
5. Добыча металлических руд	-0,132	0,939	0,001	0,070	-0,078	-0,002	-0,133
6. Прочие отрасли горнодобывающей промышленности	0,474	0,047	0,135	-0,129	0,753	0,026	0,037
7. Переработка сельхозпродукции	-0,257	-0,222	0,844	-0,027	-0,116	-0,052	0,098
8. Производство текстильных изделий	-0,248	-0,265	0,362	-0,177	-0,244	0,637	0,201
9. Производство кожи, изделий из кожи и производство обуви	-0,227	0,147	-0,467	-0,367	-0,292	0,351	0,311
10. Производство древесины и деревянных изделий	-0,146	0,097	-0,152	-0,174	-0,106	0,019	-0,924
11. Производство бумаги и картона, типографское дело	-0,055	-0,087	-0,185	-0,089	0,919	-0,021	0,076
12. Производство кокса, перегонка нефти, производство и переработка ядерных материалов	0,877	0,063	0,158	0,224	0,010	0,080	0,055
13. Химическая промышленность	0,157	0,184	0,014	0,885	-0,063	0,055	0,085
14. Производство резиновых и пластмассовых изделий	0,201	-0,105	-0,144	0,875	-0,139	-0,034	0,084
15. Производство прочих неметаллических минеральных продуктов	0,780	-0,131	-0,333	-0,080	0,369	0,095	-0,266
16. Metallургическая промышленность и обработка металлов	-0,032	0,966	-0,072	0,089	-0,004	0,051	-0,096
17. Производство и ремонт машин и оборудования, запасных деталей	0,184	0,803	-0,157	-0,074	0,049	0,044	0,153
18. Прочие отрасли обрабатывающей промышленности	-0,093	0,921	-0,259	0,046	-0,003	0,089	-0,046
19. Производство и распределение электроэнергии, газа и воды	0,837	-0,076	0,023	-0,126	0,005	-0,395	0,145
20. Строительство	0,864	-0,026	-0,307	0,330	0,097	0,102	0,067

Для объяснения отобранных факторов в каждой строке повёрнутой факторной матрицы необходимо отметить ту факторную нагрузку, которая имеет наибольшее абсолютное значение

<sup>1</sup> Метод отбора: Анализ главных компонентов.

<sup>2</sup> Метод вращения: Варимакс с нормализацией Кайзера.

<sup>3</sup> Вращение осуществлено за 8 итераций.

(выделено в таблице 5 жирным шрифтом). Как уже было отмечено выше, эти факторные нагрузки следует понимать как корреляционные коэффициенты между переменными и факторами.

Так, по данным таблицы 4 видно, что переменная 1 – «Сельское хозяйство, охота и лесоводство» – наиболее сильно коррелирует с фактором 3, а именно, коэффициент корреляции составляет 0,933, переменная 5 – «Добыча металлических руд» – сильнее всего коррелирует с фактором 2 (0,939) и т. д. В большинстве случаев включение отдельной переменной в один фактор, осуществляемое на основе коэффициентов корреляции, является однозначным. В исключительных случаях, как, например, в ситуации с переменной 3 – «Добыча угля и лигнита, разработка торфа» – переменная может относиться к двум факторам одновременно (2 (0,698) и 3 (0,546) факторы).

Могут быть также и переменные, в нашем примере 2 – «Рыболовство, рыбоводство» и 10 – «Производство древесины и деревянных изделий», которыми нельзя нагрузить ни один из отобранных факторов.

Результаты проведенного факторного анализа можно представить в форме таблицы 5 (отрасли расположены в порядке убывания их факторных нагрузок). Изучение полученных данных позволяет сделать вывод об идентификации шести основных национальных кластеров, базируясь на прямых и косвенных связях отраслей таблиц «затраты – выпуск» Республики Казахстан.

Первичные отрасли для каждого условного кластера выделены жирным шрифтом в таблице 5. Вторичными отраслями для каждого кластера являются остальные отрасли.

Не все идентифицированные кластеры могут быть развиты в ВКО, в силу ограничения имеющихся производственных факторов и ресурсов региона.

Таблица 5. Итоговые результаты факторного анализа методом главных компонент

1 фактор (Нефтяной кластер):	<b>4. Добыча сырой нефти и природного газа;</b> 12. Производство кокса, перегонка нефти, производство и переработка ядерных материалов; 20. Строительство; 19. Производство и распределение электроэнергии, газа и воды; 15. Производство прочих неметаллических минеральных продуктов; 6. Прочие отрасли горнодобывающей промышленности.
2 фактор (Горно-металлургический кластер):	<b>5. Добыча металлических руд;</b> 16. Metallургическая промышленность и обработка металлов; 18. Прочие отрасли обрабатывающей промышленности; 17. Производство и ремонт машин и оборудования, запасных деталей; 3. Добыча угля и лигнита, разработка торфа.
3 фактор (Сельскохозяйственный кластер):	<b>1. Сельское хозяйство, охота и лесоводство;</b> 7. Переработка сельхозпродукции; 3. Добыча угля и лигнита, разработка торфа; 8. Производство текстильных изделий.
4 фактор (Химический кластер):	<b>13. Химическая промышленность;</b> 14. Производство резиновых и пластмассовых изделий.
5 фактор:	<b>11. Производство бумаги и картона, типографское дело;</b> 6. Прочие отрасли горнодобывающей промышленности; 15. Производство прочих неметаллических минеральных продуктов.
6 фактор (Кластер по производству одежды и обуви):	<b>8. Производство текстильных изделий;</b> 9. Производство кожи, изделий из кожи и производство обуви.
7 фактор	к нему нельзя отнести ни одной отрасли.

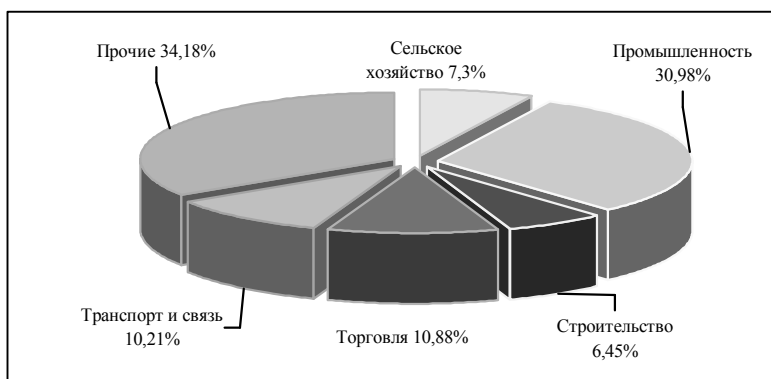
## **6. Оценка отраслевой специализации Восточно-Казахстанской области**

Для определения наиболее перспективных и конкурентоспособных кластеров необходимо провести анализ отраслевой специализации региона.

Восточно-Казахстанская область – это регион с огромным



демографическим, техническим, ресурсным потенциалом, уникальными природными богатствами. Основным индикатором экономического развития региона является внутренний региональный продукт (ВРП). По уровню произведенного ВРП ВКО в 2007 г. занял пятую позицию по шкале убывания (6,23%) после г. Алматы (20,82%), Атырауской области(9,60%), Карагандинской области (8,91%), г. Астана (8,83%) [5]. В 2007 г. ВРП ВКО составил 800527,5 млн. тенге. В структуре ВРП ВКО преобладает доля ВДС промышленного производства – 30,98%, что подтверждает преимущественно индустриальную направленность развития экономики региона. Отраслевая структура ВРП ВКО показана на рис. 1.



*Рис. 1. Структура Валового Регионального продукта Восточного Казахстана в 2006 г.*

В ближайшие годы серьезных изменений структуры ВРП не ожидается, поэтому при выработке региональной политики экономического развития Восточного Казахстана на ближайшую перспективу акцент необходимо прежде всего делать на формирование промышленных кластеров, опираясь на сложившуюся материально-техническую, ресурсную, демографическую, научно-исследовательскую базу региона.

Наибольший удельный вес в отраслевой структуре промышленного производства области занимает обрабатывающая

промышленность – 74%. В обрабатывающей промышленности в 2007 г. доля металлургической промышленности и обработки металлов составила 64,91%, переработка сельскохозяйственных продуктов – 10,1%, машиностроение – 9,08%, производство прочих неметаллических минеральных продуктов – 5,72% и т. д. (см. рис. 2).



Рис. 2. Распределение обрабатывающей отрасли по основным подотраслям в 2007 г., %

Оценка отраслевой специализации региона выявила, что базовым для развития экономики ВКО является горно-металлургический комплекс: выпуск продукции данной отрасли составляет около 65% общего физического объема промышленного производства. Основные показатели развития отрасли представлены в таблице 6. К тому же предприятия

горно-металлургической промышленности ВКО в силу своего интеллектуального, производственного, финансово-экономического, научно-технического потенциала наиболее подготовлены для реализации индустриально-инновационной политики, вносят значительный вклад в диверсификацию экономики страны, они потенциально инновационно-ориентированы.

*Таблица 6. Анализ воздействия горно-металлургического комплекса на экономику ВКО*

Показатель	2007 год
Доля в валовом региональном продукте	20,8%
Доля в областном физическом объеме промышленного производства	65%
Доля в республиканском физическом объеме промышленного производства	4,03%
Доля в областном экспорте	63,8%
Число крупных предприятий	20
Занятость	41400 человек
Ведущие предприятия отрасли	АО «Казцинк», АО «ТМК», АО «УМЗ»

В ближайшей перспективе целесообразным представляется создание благоприятной бизнес-среды, что позволит выстроить целостную систему сопряженных производств потенциального горно-металлургического кластера, ориентированных на максимальный конечный результат. Кроме того, горно-металлургические предприятия представляют собой единый производственно-хозяйственный комплекс, имеющий в своем составе предприятия по добыче, обогащению и металлургической переработке, а также энерго- и тепловырабатывающие предприятия, развитую инфраструктуру, обеспечивающую финансовые, маркетинговые, сбытовые, внешнеэкономические, научно-исследовательские работы.

Взаимосвязанные отрасли, выявленные при помощи факторного анализа (см. таблицу 5), составят собой ядро потенциального горно-металлургического кластера ВКО. Каждая из них

представляет собой звено в ценовой цепочке, которое добавляет свою цену к конечному продукту. Такая цепочка имеет вертикальную конструкцию и показывает, что звенья цепи находятся не в конкурентных отношениях друг с другом, а в тесном сотрудничестве, направленном на достижение одной общей цели. Любое отдельное звено в этой цепи может искать возможности выполнения задач, присущих другим звеньям цепи для получения большей доли добавочной стоимости.

Промышленно-производственное ядро должен окружать инфраструктурный сегмент – разнопрофильные организации и учреждения, обеспечивающие подготовку профессиональных кадров, разработку новых технологий, оказывающих финансовые, информационные и другие услуги. Важнейшая роль здесь принадлежит правительственным или другим законодательным структурам, которые должны обеспечить высококачественную разработку законодательной и нормативной базы для эффективной деятельности субъектов предпринимательства: разработать правоприменительные механизмы, гарантирующие соблюдение законности и равноправия представителей бизнеса в отношениях с органами власти, обеспечения безопасности бизнеса от криминальных действий, создания специализированных институтов по поддержке предпринимательства, сформировать национальную инновационную систему, обеспечить приток квалифицированных кадров и т. д. Государство, в целях обеспечения частному капиталу благоприятных условий, гарантирующих получение высоких прибылей и усиления их конкурентоспособности, должно обеспечить создание промышленной и социальной инфраструктуры. Это комплекс капиталоемких отраслей производственной и непроизводственной сфер, которые невыгодно развивать частному капиталу. К ним относятся вопросы создания технопарков и технополисов, научных центров, культурных, оздоровительных и других учреждений.

Схематично кластер в металлургической промышленности можно представить следующим образом (см. рис. 3). Данная схема представляет собой типичную кластерную карту горно-металлургической промышленности и позволяет рассмотреть связи между участниками кластера, хорошо развитые и слабо

развитые компоненты индустрии, а также необходимые компоненты для развития кластера.

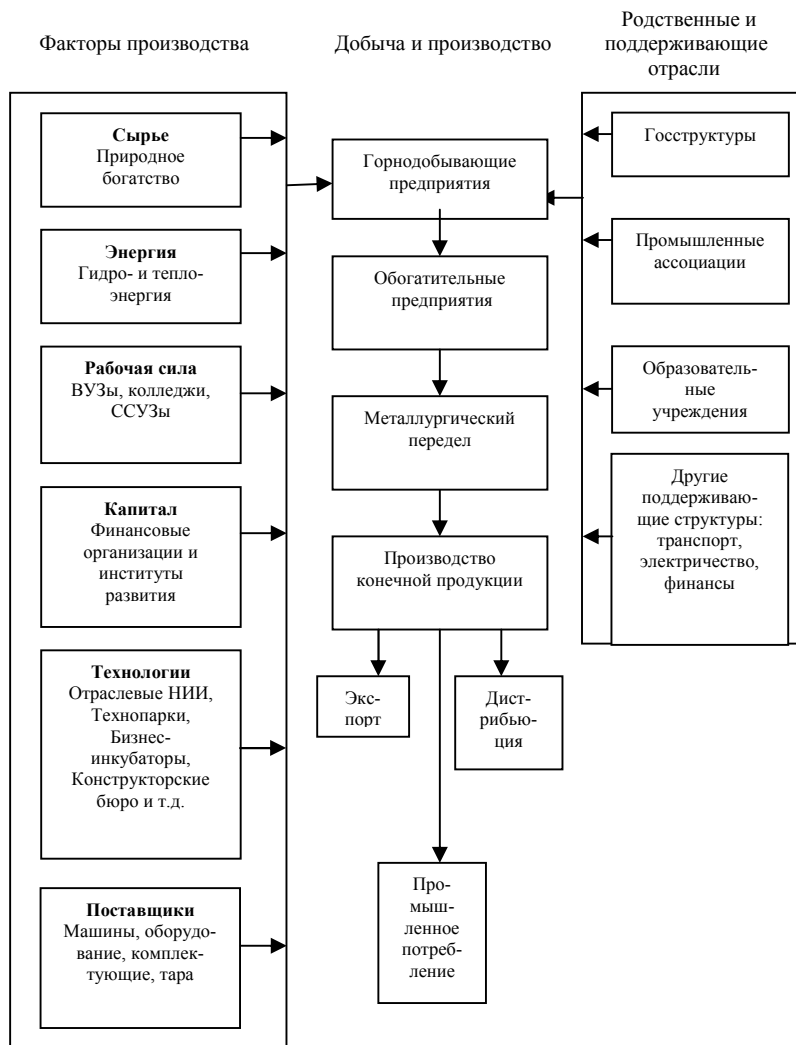


Рис. 3. Структура горно-металлургического кластера ВКО

Важным этапом создания горно-металлургического кластера ВКО является определение базовых предприятий, которые сформируют ядро кластера. Несомненно, такими предприятиями выступят ведущие предприятия отрасли: АО «Казцинк», АО «Усть-Каменогорский титано-магниевого комбинат», АО «Ульбинский металлургический завод».

Анализ деятельности ведущих предприятий отрасли позволяет сделать вывод о том, что в горно-металлургическом комплексе ВКО уже состоялись холдинговые кластеры: цинка, свинца (АО «Казцинк»), титановой губки (АО «Усть-Каменогорский титано-магниевого комбинат»), в производстве редких и благородных металлов (АО «Ульбинский металлургический завод»). Основная продукция, выпускаемая этими предприятиями, – это сырье и полуфабрикаты невысокой товарной ценности. Основу этих кластеров составили производственные мощности высокого уровня развития, созданные еще во времена СССР, что дало этим кластерам огромное конкурентное преимущество в виде экономии на капитальных затратах. Большое естественное конкурентное преимущество создает уникальная по количеству и разнообразию сырьевая база горно-металлургического комплекса, высокая квалификация трудовых ресурсов, сложившаяся инфраструктура. В удержании конкурентоспособности и низкой себестоимости продукции немалую роль играют дешевизна рабочей силы и низкая экологическая ответственность.

Для повышения же конкурентоспособности выпускаемой продукции, достижения высоких темпов производства, необходимо переориентировать производственные мощности действующих металлургических предприятий на выпуск металла и продукции с высокой добавленной стоимостью; создать комплекс инновационных производств на основе собственной минерально-сырьевой базы. То есть создание горно-металлургического кластера предполагает объединение всех участников цепочки добавленной стоимости: технологической цепочки четырех переделов металлургического производства (добыча руд, обогащение руд и производство концентратов, плавка или получение чистого рафинированного металла и

выпуск готовой металлической продукции), родственных и поддерживающих отраслей (строительство, машиностроение, автомобильная индустрия), институтов, занимающихся проблемами металлургической отрасли (Институт металлургии и обогащения МОН РК, Институт горного дела и др.) организаций и учреждений, обеспечивающих подготовку профессиональных кадров, разработку новых технологий, оказывающих финансовые, информационные, консалтинговые и другие услуги.

Таким образом, формирование и развитие горно-металлургического кластера в Восточно-Казахстанской области позволит обеспечить увеличение объема наукоемкой, высокотехнологичной продукции в валовом региональном продукте ВКО; переориентировать производственные мощности действующих металлургических предприятий на выпуск металла и продукции с высокой добавленной стоимостью; создать комплекс инновационных производств на основе отечественной минерально-сырьевой базы и дешевых трудовых ресурсов, что будет способствовать ускорению темпов экономического роста области и позволит сохранить лидирующее положение металлургической промышленности в экономике Восточно-Казахстанской области в течение длительного периода времени.

## **7. Оценка структурных воздействий горно-металлургического кластера на экономику Восточно-Казахстанской области**

Измерение последствий экономических воздействий на экономику региона играет в современном региональном анализе центральную роль. В настоящее время для этих целей, как правило, используют региональные модели общего экономического равновесия, *Regional CGE Models (Regional Computable General Equilibrium Models)*, представляющие собой комбинацию матричных и эконометрических моделей [6]. Обычно в качестве основы такой модели используется матрица финансовых потоков (или матрица счетов для анализа социальных процессов, МССП). Региональные *CGE* позволяют при определенных условиях производить прогнозные расчеты, что особенно важно

для целей регионального оперативного и стратегического планирования. Для получения оценок статических воздействий, как правило, достаточно только матричных моделей – таких, как межотраслевой баланс (таблицы «затраты – выпуск») и МССП.

Как уже отмечалось выше, в основе оценки экономических воздействий на основе таблиц «затраты – выпуск» лежит матричное уравнение Леонтьева, что позволяет оценить возможные изменения валового выпуска и уровня использования первичных факторов при некотором данном изменении конечного спроса.

Если  $\Delta Y$  – вектор изменений конечного спроса, тогда формула 1 примет вид:

$$(7) \Delta X = (1 - A) - \Delta Y.$$

Полученное уравнение (7) позволяет определить прямой и косвенный эффекты влияния изменений конечного спроса на валовой выпуск (за счет дополнительного дохода, импорта и т. д.).

Обширная практика применения метода «затраты – выпуск» за рубежом привела к формированию определенных стандартов такого рода анализа.

Как правило, рассчитывают 3 вида мультипликаторов для каждой отрасли экономики [6, 7]:

1) мультипликатор валового выпуска показывает, насколько вырастет валовой выпуск во всех сферах экономики района на единицу прироста общего объема продаж в  $i$ -ой отрасли;

2) мультипликатор добавленной стоимости показывает, насколько вырастет валовая добавленная стоимость во всех сферах экономики района на единицу прироста общего объема продаж в  $i$ -ой отрасли;

3) мультипликатор доходов домашних хозяйств показывает, насколько вырастут доходы домашних хозяйств в результате 1%-го прироста общего объема продаж в  $i$ -ой отрасли.

Расчет мультипликаторов для каждого продукта (чистой отрасли) региональной экономики основывается на определении прямого и косвенного эффектов.

Прямой эффект рассчитывается как отношение величины приращения соответствующего показателя в данной отрасли ( $\phi$ )



к изменению конечного спроса в данной отрасли ( $Y_i$ ):

$$(8) \quad K_i^j = \frac{\Delta \varphi_i^j}{\Delta Y_i},$$

где:  $i$  – номер отрасли;  $j$  – номер мультипликатора.

Косвенный эффект определяется как изменение суммарной величины данного показателя в остальных отраслях региона ( $\Delta \Phi^j - \Delta \varphi_i^j$ ) отнесенное к изменению конечного спроса в данной отрасли:

$$(9) \quad H_i^j = \frac{\Delta \Phi^j - \Delta \varphi_i^j}{\Delta Y_i}.$$

Оценка численного значения полного мультипликатора получается путем суммирования значений мультипликаторов прямого и косвенного эффектов.

Мультипликаторы, рассчитываемые на основе межотраслевого баланса, являются наиболее универсальным инструментом анализа статического влияния горно-металлургического комплекса на экономику Восточно-Казахстанского региона. Высокий аналитический потенциал этого инструмента объясняется его достаточно очевидным экономическим смыслом и определенной простотой интерпретации.

Анализ экономического воздействия создаваемого горно-металлургического кластера на экономику Восточно-Казахстанской области проведен на основе расчета мультипликаторов влияния отраслей, составляющих основу кластера, идентифицированных в ходе проведения факторного анализа методом главных компонент (таблица 5). Полученные данные представлены в таблице 7.

Полученные данные показывают, что наибольшие значения мультипликаторов наблюдаются в первичных отраслях. Это можно объяснить следующим: 1%-ный прирост продаж в первичных отраслях вызывает по производственной цепочке больший прирост на следующих переделах, чем 1%-ный рост в выпуске конечной продукции, так как в этом случае рост выпуска продукции первичных переделов увеличивается лишь в тех объемах, которые нужны для обеспечения потребностей такого

роста. К тому же в структуре валового выпуска конечной продукции большую долю занимает импорт товаров и услуг. Для увеличения мультипликативного эффекта влияния этих отраслей необходимо снижать долю импорта в структуре затрат за счет налаживания аналогичных производств в регионе.

Таблица 7. Мультипликаторы влияния горно-металлургического кластера на экономику ВКО

Отрасль	Мультипликатор валового выпуска	Мультипликатор добавленной стоимости	Мультипликатор доходов домашних хозяйств
Добыча металлических руд	1,806	0,608	2,073
Металлургическая промышленность и обработка металлов	1,628	0,597	1,719
Прочие отрасли обрабатывающей промышленности	1,438	0,457	2,147
Производство и ремонт машин и оборудования, запасных деталей	1,158	0,326	1,348

Анализ мультипликаторов подтверждает целесообразность формирования горно-металлургического кластера в ВКО, так как в данном случае происходит объединение предприятий в единую производственную цепочку, которая вызывает более значительный прирост основных макроэкономических показателей, чем развитие отдельных отраслей. Преимущественная экспортная ориентация отраслей при наблюдающемся на мировых рынках росте спроса на выпускаемую ими продукцию будет способствовать ускорению темпов экономического роста области.

## **8. Заключение**

В современных условиях развитие отдельных территорий становится основой повышения конкурентоспособности регионов и государства в целом. Мировой опыт дает множество примеров повышения конкурентоспособности страны и входящих в нее регионов путем реализации кластерной стратегии развития экономики, характеризующейся тесным взаимодействием государственных органов и предприятий.

Кластер является относительно новым понятием, трактуемым в экономике весьма широко. Несмотря на многообразие подходов к определению понятия «кластер», основными неотъемлемыми элементами кластера являются географическое соседство, межфирменная сеть и межорганизационная, или институциональная, сеть; собранные вместе, эти показатели отличают кластер от любого другого социально-экономического явления.

Неоднородность подходов к определению кластеров определяет и множественность способов идентификации кластеров, включающих как количественные, так и качественные методы. У каждого подхода существуют как сильные, так и слабые стороны. Существует общее мнение, что для распознавания кластеров необходимо соединить качественный и количественный анализ.

Нами предложена модель идентификации региональных кластеров (на примере Восточно-Казахстанской области), базирующаяся на изучении межотраслевых связей национальных таблиц «затраты – выпуск» с помощью факторного анализа методом главных компонент. В качестве наиболее конкурентоспособной специализации региона определен горно-металлургический кластер, развитие которого будет способствовать отходу от сырьевой направленности региональной экономики и ускорению ее экономического роста.

Для оценки структурного влияния горно-металлургического кластера на экономику региона были рассчитаны мультипликаторы валовой прибыли, добавленной стоимости и доходов домашних хозяйств с использованием коэффициентов прямых

затрат национальных таблиц «затраты – выпуск». Анализ мультипликаторов подтвердил целесообразность создания горно-металлургического кластера в Восточно-Казахстанской области, так как развитие последующих переделов будет увеличивать мультипликативный эффект и содействовать ускорению темпов экономического роста области.

### **Литература**

1. *Иллюстрированный самоучитель по SPSS* // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.hardline.ru/selfteachers/Info/Mathematic/SPSS/index.html>.
2. ПОРТЕР М. *Конкуренция: Учебное пособие* / Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2001. – 495 с.
3. *Постановление Правительства Республики Казахстан «Об утверждении планов по созданию и развитию пилотных кластеров в приоритетных секторах экономики» №633 от 25 июня 2005 года*
4. *Руководство по развитию кластеров*. – Алматы: АО «Центр маркетингово-аналитических исследований», 2006. – 56 с.
5. *Статистический ежегодник Казахстана / Статистический сборник / Под ред. К. С. АБДИЕВА*. – Алматы: Агентство РК по статистике, 2007. – 524 с.
6. ТАТАРИНОВ А. *Субнациональные счета: проблемы разработки и использование в региональном анализе*. – М.: ИЭПП, 2005. – 163 с.
7. ARMSTRONG, H., TAYLOR, J. *Regional economics and policy*. – Blackwell Publishing Ltd, 2003. – 437 p.
8. CZAMANSKI, D., DE ABLAS L. A. *Identification of industrial clusters and complexes: a comparison of methods and findings* // *Urban Studies*. – 1979. – Vol. 16. – P. 61-80.
9. FESER, E. J., LUGER, M. *Cluster analysis as a mode of inquiry: It's use in science and technology policymaking in North Carolina* // *European Planning Studies*. – 2002. – Vol. 11, №1. – P. 1-14.

10. FESER, E. J., BERGMAN, E. M. *National industry cluster templates: A framework for applied regional cluster analysis* // *Regional Studies*. – 2000. – Vol. 34, №1. – P. 1-19.
11. HILL, E. W., BRENNAN, J. F. *A Methodology for identifying the drivers of industrial clusters: the foundation of regional competitive advantage* // *Economic Development Quarterly*. – 2000. – Vol. 14. – P. 67-96.
12. ISARD, W., SCHOOLER, E. W., VIETORISZ, T. *Industrial complex analysis and regional development: A case study of refinery-petrochemical-synthetic-fiber complexes and Puerto Rico*. – Cambridge: Technology Press of the Massachusetts Institute of Technology, 1959.
13. LAMMARINO, S., MCCANN, P. *Firm location and technology: stylized constructs and illusory policies? Presented at the 4th European Meeting on Applied Evolutionary Economics (EMAE)*. – Utrecht, Netherlands, 2005.
14. MALIZIA, E. E., FESER, E. J. *Understanding local economic development*. – New Brunswick, NJ: Center for Urban Policy Research, Rutgers University, 1999.
15. REDMAN, J. *Understanding State Economics through Industries Studies*. – Washington DC: Council of Governor's Policy Advisors, 1994.
16. ROCHA, H. O. *Entrepreneurship and regional development: The role of clusters. Thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for a Doctor of Philosophy degree at University of London*. – London, 2004.
17. ROEPKE, H. D., ADAMS, D., WISEMAN, R. *A new approach to the identification of industrial complexes using input-output data* // *Journal of Regional Science*. – 1974. – Vol. 14, №1. – P. 15-29.
18. ROSENFELD, S.A. *Industrial Strength Strategies: Regional Business Cluster and Public Policy*. – Washington, DC. The Aspen Institute, 1995.
19. SWANN, P., PREVEZER, M. *A comparison of the dynamics of industrial clustering in computing and biotechnology* // *Research Policy*. – 1996. – Vol. 25. – P. 1139-1157.

20. VOM HOFE, R., CHEN, K. *Whether or not industrial cluster: conclusions or confusions?* // The Industrial Geographer. – 2006. – Vol. 4, issue 1. – P. 2-28.

**IDENTIFICATION OF REGIONAL INDUSTRIAL CLUSTERS AND ESTIMATION OF THEIR STRUCTURAL INFLUENCE ON REGIONAL ECONOMY (IN CASE OF THE EAST-KAZAKHSTAN REGION)**

**Erken Turganbaev**, The East-Kazakhstan state technical university named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, The Republic of Kazakhstan, the dean of faculty of information technologies and power, Cand. Sc. (ETurganbaev@ektu.kz)

**Marina Kozlova**, The East-Kazakhstan state technical university named after D. Serikbaev, Ust-Kamenogorsk, The Republic of Kazakhstan, the tutor (Mara\_Koz@mail.ru)

*Abstract: Basic approaches to define the concept of "cluster" are considered along with the methods to identify clusters. The model of clusters formation is proposed. The model bases on national "Input-Output" tables at regional level. In case of the East Kazakhstan region the most perspective for regional economy's development mining and smelting cluster is revealed. The estimation of structural influence of the basic segments of mining and smelting cluster on the economy of the East-Kazakhstan region is performed.*

Keywords: cluster, principal components factor analysis, "Input-Output" tables, multiplier.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р.М. Нижегородцевым*

УДК 681.5.013 + 621.18.5

ББК 32.965

## СИНТЕЗ РОБАСТНОГО $H_\infty$ -РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ <sup>1</sup>

Курдюков А. П. <sup>2</sup>, Тимин В. Н. <sup>3</sup>

*(Учреждение Российской академии наук Институт проблем  
управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

*В статье с использованием  $H_\infty$ -метода формирования контура с ограничением на размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы в заданной области с привлечением аппарата линейных матричных неравенств решается задача синтеза робастного регулятора для управления котельной установкой. Требования к замкнутой системе формулируются как в виде частотных ограничений на сингулярные числа передаточной функции разомкнутой системы, так и в форме ограничений на размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы в заданной области на комплексной плоскости. Проведена редукция  $H_\infty$ -регулятора полного порядка, полученного в результате синтеза.*

Ключевые слова: управление котельной установкой,  $H_\infty$ -теория управления, линейные матричные неравенства (ЛМН),  $H_\infty$ -метод формирования контура, расположение полюсов замкнутой системы в заданной области, редукция регулятора.

<sup>1</sup> Работа выполнена в рамках Межсекционной программы ОЭМПУ РАН №2 "Проблемы управления и безопасности энергетики и технических систем".

<sup>2</sup> Александр Петрович Курдюков, доктор технических наук, профессор, (akurd@ipu.ru).

<sup>3</sup> Виктор Николаевич Тимин, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, (timin.victor@rambler.ru.) (Москва, ул. Профсоюзная, д. 65).

## **Введение**

Энергетические системы включают в себя разнообразные источники производителей электрической энергии. Широкое распространение получили тепло-энергетические установки. Преобразование энергии топлива при горении в топке котла в электрическую энергию представляет собой сложный многоуровневый процесс. На тепловой электрической станции первичная внутренняя энергия топлива при сгорании его в топках котлов превращается в тепло продуктов сгорания. Это тепло нагревает воду и превращает ее в пар, который подается на турбину. В турбине тепловая энергия пара переходит в кинетическую энергию движущейся струи пара. Пар, проходя с большой скоростью между лопатками турбины, заставляет ротор турбины вращаться. Механическая энергия вала турбины передается электрогенератору, в котором она превращается в электрическую.

Котельная установка состоит из собственно котла, топочного устройства, пароперегревателя, водяного экономайзера, воздухоподогревателя, каркаса, обмуровки, арматуры, котельно-вспомогательного оборудования и трубопроводов. Котел барабанного типа состоит из системы труб поверхностей нагрева, объединенных между собой барабанами и камерами. Паровой котел предназначен для получения насыщенного пара. Топочные устройства предназначены для превращения внутренней энергии топлива в тепловую энергию продуктов сгорания. В пароперегревателе происходит перегрев насыщенного пара до заданной температуры за счет тепла продуктов сгорания. В водяном экономайзере питательная вода нагревается за счет дополнительного использования тепла дымовых газов и направляется в собственно котел с температурой, близкой к температуре насыщения. Воздухоподогреватель предназначен для интенсификации и повышения устойчивости процесса сгорания топлива, а также дальнейшего использования тепла продуктов сгорания. В паровых котлах тепло, выделяющееся

180



при сжигании топлива, передается от продуктов сгорания воде и пару. Передача тепла осуществляется через поверхности нагрева, которые у современных котлов представляют собой трубные пакеты (пучки), в которых дымовые газы проходят между расположенными в несколько рядов трубами. В паровых котлах барабанного типа с естественной циркуляцией вода из барабана отпускаяется по необогреваемым (опускным) трубам в нижние сборные коллекторы и затем вместе с образующимся паром поднимается самотеком по обогреваемым (подъемным) трубам опять в барабан. В барабане вода отделяется от пара и снова направляется в водоотпускные трубы. Основными поверхностями нагрева котлов с естественной циркуляцией являются: экономайзер, в котором питательная вода нагревается до поступления в барабан, испарительные трубы и пароперегреватель. Перегретый пар под давлением подается в коллектор.

Математическая модель физических процессов, происходящих в котельной установке, является сложной многосвязной нелинейной системой, поэтому задача ее автоматического управления до настоящего времени является актуальной. В данной работе используется динамическая модель котельной установки, идентифицированная на основе данных, полученных на тепловой электростанции компании Syncrude Canada, Ltd. (SCL) в номинальном режиме работы [29]. Котельная установка барабанного типа с естественной циркуляцией обеспечивает на выходе давление перегретого пара 6,306 МПа и температуру 500°C. Регулирование давления и температуры перегретого пара осуществляется изменением расходов воздуха и топлива в топке, питательной воды и пароохладителя.

К работе котельной установки в нормальном режиме работы предъявляются следующие требования: давление пара в паровом котле должно поддерживаться на постоянном уровне независимо от количества потребляемого пара; количество воды в котле должно поддерживаться на желаемом уровне для

исключения перегрева или затопления; температура пара должна поддерживаться на желаемом уровне, чтобы предотвратить перегрев паранагревателя и предотвратить попадание мокрого пара в турбину. Кроме того, в результате неточности описания математической модели в нормальных условиях работы появляются колебания регулируемых параметров, которые регулятору необходимо сглаживать.

Для решения задачи автоматического управления котельными установкам применялись различные методы синтеза регуляторов, а именно: управление с помощью гауссовского линейно-квадратичного (*linear quadratic Gaussian-LQG*) регулятора [11], управление с помощью модифицированного линейно-квадратичного гауссовского (*LQG/loop transfer recovery-LTR*) регулятора [17],  $H_\infty$ -управление по подходу смешанной чувствительности (*mixed-sensitivity approach*) [24], управление с учетом внутренней модели (*internal-model control-IMC*) [25], управление с помощью  $H_\infty$ -метода формирования контура (*loop-shaping  $H_\infty$  approach*) [29].

Синтез законов управления котельной установкой с целью улучшения робастной устойчивости и качества переходных процессов составляет достаточно сложную и актуальную задачу. С этой целью в данной работе исследуется возможность применения  $H_\infty$ -робастных регуляторов, полученных с помощью  $H_\infty$ -метода формирования контура при ограничении на размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы в заданной области.

С инженерной точки зрения под синтезом системы управления можно понимать построение системы управления, обеспечивающей выполнение всех предъявляемых к ней технических требований. Проектируемая система управления должна обеспечивать приемлемое качество переходных процессов, необходимую точность и грубость (робастность) к неопределенности в модели объекта управления.

Требования к проектируемой системе могут формулироваться как во временной, так и в частотной

областях [2]. Расположение и вид корней характеристического полинома (полюсов передаточной функции замкнутой системы) определяют характер переходного процесса. Поэтому требования к запасу устойчивости и быстродействию, не рассматривая кривые переходного процесса, можно сформулировать, накладывая ограничения на корни характеристического полинома. Таким образом, задавая ограничения на расположение и вид корней характеристического полинома, мы задаем ограничения во временной области на вид переходного процесса и, очевидно, на максимальные значения регулируемой величины, значения перерегулирования, времени переходного процесса и др.

Требования к расположению полюсов передаточной функции замкнутой системы в некоторой заданной области на комплексной плоскости позволяет задавать ограничения на:

- быстродействие, которое может быть оценено по степени устойчивости (абсолютной величине действительной части ближайшего к мнимой оси корня);
- запас устойчивости, который может быть оценен по колебательности (максимальному отношению мнимой части корня к его действительной части) или параметру затухания (коэффициенту демпфирования);
- максимальную угловую частоту собственных колебаний системы (максимальную абсолютную величину мнимой части корня).

Размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы в области, изображенной на рис. 1, гарантирует:

- затухание колебаний переходных процессов не менее  $\eta$  ;
- коэффициент демпфирования (параметр затухания) не менее  $\zeta = \cos\varphi$  (или колебательность не более  $\mu = \operatorname{tg}\varphi$ ) ;

- максимальную угловую частоту собственных колебаний системы не более  $\omega_0 = \alpha \operatorname{tg} \varphi$ .

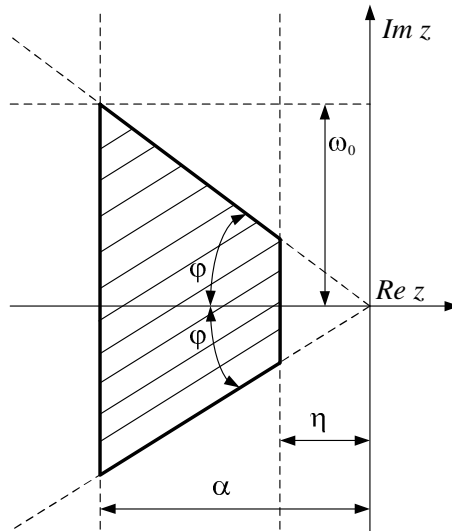


Рис. 1. Заданная ЛМН-область

В настоящее время в теории управления широко используется аппарат линейных матричных неравенств (ЛМН) [1, 8, 9, 10, 15, 16, 27]. Он хорошо подходит для синтеза регулятора в обратной связи, когда различные требования к замкнутой системе можно задавать в виде ЛМН. Концепция расположения полюсов в выпуклой области, которая может быть описана ЛМН, предложена в [9]. Класс областей, описываемый ЛМН, представляет достаточно широкое множество областей для размещения полюсов, включая полуплоскости, круги, секторы, вертикальные и горизонтальные полосы, а также любые пересечения перечисленных областей.

В концепции из работы [9] процедура синтеза регулятора сводится к минимизации какого-либо критерия оптимальности на заданной ЛМН-области. Так в работах [9, 10] рассматривается задача синтеза  $H_\infty$ -оптимального регулятора с расположением

полюсов замкнутой системы в ограниченной выпуклой области на комплексной плоскости, которая сводится к решению ЛМН. В русскоязычной литературе данный метод более подробно описан в [4]. Вопросы чувствительности к возмущениям и шумам, а также точностные характеристики при таком подходе считаются менее сложными и не рассматриваются, однако они требуют дополнительного решения.

Альтернативным подходом является синтез системы управления в частотной области. Одним из широко распространенных современных методов синтеза в частотной области для многомерных систем является  $H_\infty$ -метод формирования контура, предложенный в работе [19]. Он основан на  $H_\infty$ -теории управления, в рамках которой проводится синтез робастных алгоритмов управления, учитывающих неопределенность в описании модели объекта управления и действующих внешних возмущений.

Под формированием контура при синтезе системы управления понимают метод, при котором непосредственно определяют форму амплитудной частотной характеристики передаточной функции разомкнутой или замкнутой системы. В работе [32] при анализе и синтезе многомерных систем управления было предложено применять сингулярные числа. Сингулярные числа комплекснозначной матрицы  $A$  определяются как квадратные корни из собственных чисел произведения матриц  $A^*A$ , где  $A^*$  – эрмитово сопряженная матрица. Зависимость сингулярных чисел передаточной функции от частоты в многомерных системах является обобщением амплитудной частотной характеристики в одномерных системах. В системах с одним входом и одним выходом эти понятия эквивалентны. Сингулярные числа характеризуют по соответствующему выходу многомерной системы коэффициент усиления на заданной частоте. Для заданной частоты минимальный (максимальный) коэффициент усиления многомерной системы характеризуется минимальным (максимальным) сингулярным числом. В многомерных системах требования к форме

амплитудных частотных характеристик передаточных функций замкнутой системы можно сформулировать в терминах ограничений типа неравенств на сингулярные числа многомерных передаточных функций замкнутой [14, 32] или разомкнутой [13, 19] систем.

Основная идея  $H_\infty$ -метода формирования контура в многомерных системах состоит в том, что максимальные сингулярные числа матричных передаточных функций замкнутой системы могут быть непосредственно аппроксимированы в соответствующих частотных диапазонах максимальными или минимальными сингулярными числами матричной передаточной функцией разомкнутой системы [13, 19].

Следовательно, требования к замкнутой системе в  $H_\infty$ -методе формирования контура могут быть заданы в частотной области в соответствующих частотных диапазонах в виде требований к максимальным и минимальным сингулярным числам многомерной передаточной функции разомкнутой системы [13, 19]. Основные требования к разомкнутой системе состоят в следующем :

- высокий коэффициент усиления (ограничение снизу на минимальные сингулярные числа) на низких частотах, который позволяет уменьшить ошибку слежения и влияние возмущений на входе и выходе объекта управления;
- малый коэффициент усиления (ограничение сверху на максимальные сингулярные числа) на высоких частотах для подавления шума и повышение робастности к неопределенности в модели объекта управления;
- плавный переход в области частот среза контура с наклоном, близким к  $-20$  дБ на декаду. В районе частоты среза коэффициент усиления контура не должен убывать быстрее чем  $-20$  дБ на декаду для того, чтобы была желаемая робастная устойчивость, запасы по амплитуде и фазе, перерегулированию и затуханию [23, 28].

В работе [19] предложен оригинальный метод формирования контура для многомерных систем. В нем впервые выдвинута идея использования нормализованной левой взаимно простой факторизации [31] модели объекта управления для обеспечения робастной устойчивости на основе решения задачи  $H_\infty$ -оптимизации [12]. Центральным элементом в методе формирования контура, предложенным в данной работе, является задача робастной стабилизации [18]. В русскоязычной литературе более подробное описание  $H_\infty$ -метода формирования контура приведено, например, в [3, 4].

Задача робастной стабилизации состоит в нахождении максимальной величины неопределенности (величины робастного запаса устойчивости), при которой один регулятор обеспечит устойчивость замкнутой системы для всего семейства возмущенных объектов с ограниченными по  $H_\infty$ -норме возмущениями. В  $H_\infty$ -методе формирования контура задача робастной стабилизации решается не для исходного, а для нового обобщенного объекта, образованного с помощью формирующих функций (префильтра и постфильтра). Обобщенный объект представляет собой последовательное соединение многомерных передаточных функций двух формирующих функций и исходного номинального объекта управления. Требуемые характеристики качества и робастности замкнутой системы обеспечиваются благодаря выбору соответствующих формирующих функций, а решение задачи робастной стабилизации гарантирует устойчивость замкнутой системы. Важно отметить, что в данном методе не требуется информации о фазовой характеристике номинального объекта. Кроме того, значение величины запаса робастной устойчивости является единственным индикатором, характеризующим степень достижения задаваемых требований к замкнутой системе.

Один из недостатков  $H_\infty$ -метода формирования контура состоит в том, что в явном виде не представляется возможным задавать требование к качеству переходных процессов в виде ограничения на коэффициент демпфирования (параметр

затухания). В частотной области аperiodичность переходного процесса определяется наклоном в  $-20$  дБ на декаду графиков сингулярных чисел (в логарифмическом масштабе) в области частот среза. Удовлетворение ограничения на коэффициент демпфирования (близость к наклону в  $-20$  дБ на декаду) в  $H_\infty$ -методе формирования контура [19] может быть обеспечен только с помощью формирующих функций, выбор которых представляет собой достаточно сложную задачу (особенно в классе формирующих функций низкого порядка).

Как уже отмечалось, задача  $H_\infty$ -оптимизации была сведена к решению системы ЛМН [15], выпуклая область на комплексной плоскости также описывается системой ЛМН [9]. Использование единого аппарата ЛМН позволило модифицировать  $H_\infty$ -метод формирования контура с учетом дополнительных ограничений на расположение полюсов передаточной функции замкнутой системы. Так, в [22] для решения энергетической задачи используется  $H_\infty$ -метод формирования контура с ограничением на коэффициент демпфирования. В [4, 5] используются идеологии  $H_\infty$ -метода формирования контура и метода размещения полюсов передаточной функции замкнутой системы в заданной ЛМН-области для решения задачи подавления внешних возмущений. С помощью аппарата ЛМН решена задача  $H_\infty$ -управления энергетической системой в аварийном режиме.

### **1. Краткий обзор задачи $H_\infty$ -оптимизации с ограничением на размещение полюсов**

Основная идея метода, изложенного в работе [9], состоит в минимизации функционала качества с ограничением на принадлежность некоторому множеству, т. е. в условной минимизации функционала. Функционалом качества служит  $H_\infty$ -норма передаточной функции замкнутой системы, а в качестве множества выступает выпуклая область на комплексной плоскости, задающая ограничение на размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы.

Применение аппарата ЛМН позволило свести задачу синтеза



$H_\infty$ -субоптимального регулятора с размещением полюсов передаточной функции замкнутой системы в ограниченной выпуклой области на комплексной плоскости к решению системы ЛМН (см. п. 1.2 настоящей статьи).

### 1.1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ $H_\infty$ -ОПТИМИЗАЦИИ С ОГРАНИЧЕНИЕМ НА РАЗМЕЩЕНИЕ ПОЛЮСОВ

Рассмотрим структурную схему замкнутой системы управления, изображенную на рис. 2. Внешними входами замкнутой системы являются сигналы  $d_1$  на выходе объекта управления  $G$  и  $d_2$  на его входе. Выходом  $z_1$  замкнутой системы является измеряемый выход объекта  $y$ , а выходом  $z_2$  – управление  $u$ , формируемое регулятором  $K_\infty$  в положительной обратной связи.  $G$  – передаточная функция объекта управления от сигнала управления  $u$  к выходу объекта  $y_0$ .

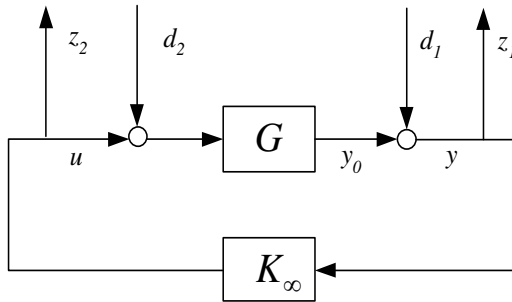


Рис. 2. Замкнутая система управления

В современной теории управления при постановке задачи синтеза регулятора используется понятие стандартного объекта

управления  $P(s) = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix}$  (см., например, [12]).

Замкнутой системе управления (см. рис. 2) соответствует стандартный объект управления  $P(s)$  (см., например, [4, 5] вида

$$(1) \quad \begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{d_1} & G(s) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G(s) \\ I_{d_2} \end{bmatrix} u(s),$$

$$y(s) = [I_{d_1} \quad G(s)] \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + G(s)u(s),$$

где  $I_{d_1}$  и  $I_{d_2}$  – единичные матрицы соответствующей размерности,  $s$  – переменная оператора Лапласа, а  $z(s)$ ,  $y(s)$ ,  $d(s)$  и  $u(s)$  – преобразования Лапласа сигналов соответственно  $z$ ,  $y$ ,  $d$  и  $u$ .

Соответствующие блоки матрицы передаточной функции стандартного объекта (1) имеют вид

$$P_{11}(s) = \begin{bmatrix} I_{d_1} & G \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_{12}(s) = \begin{bmatrix} G \\ I_{d_2} \end{bmatrix},$$

$$P_{21}(s) = [I_{d_1} \quad G], \quad P_{22}(s) = G.$$

Передаточная функция замкнутой системы с объектом управления  $G$  и регулятором  $K_\infty$  в обратной связи от всех внешних входов  $w = [d_1^T, d_2^T]^T$  к выходам замкнутой системы  $z = [y^T, u^T]^T$  определяется формулой

$$(2) \quad T_{wz}(G, K_\infty) = \begin{bmatrix} (I - GK_\infty)^{-1} & (I - GK_\infty)^{-1}G \\ K_\infty(I - GK_\infty)^{-1} & K_\infty(I - GK_\infty)^{-1}G \end{bmatrix}.$$

В терминах стандартного объекта передаточная функция  $T_{wz}$  замкнутой системы определяется нижним дробно-линейным преобразованием (см., например, [33]) вида

$$T_{wz}(G, K_\infty) = T_{wz}(P, K_\infty) = P_{11} + P_{12}(I - P_{22}K_\infty)^{-1}P_{21}.$$

Описанию стандартного объекта в виде передаточных функций (1) в пространстве состояний (или  $(A, B, C, D)$ -представление) соответствует система уравнений вида

$$(3) \quad \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u, \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u, \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u. \end{aligned}$$

Представление в пространстве состояний (3) стандартного объекта (1) определяется всевозможными связями в замкнутой системе и включает матрицы  $(A, B, C, D)$ -представления номинального объекта  $G(s)$ .

Связь между матричными передаточными функциями  $P_{ij}(s)$  стандартного объекта (1) и представлением в пространстве состояний (3) стандартного объекта определяется уравнениями вида

$$P_{ij}(s) = C_i(sI - A)^{-1}B_j + D_{ij}, \quad i, j = 1, 2.$$

Опишем линейными матричными неравенствами ограниченную выпуклую область на комплексной плоскости, в которой необходимо разместить полюса передаточной функции замкнутой системы. Согласно [9], любая выпуклая область комплексной плоскости, симметричная относительно действительной оси, может быть аппроксимирована ЛМН-областью с любой заданной точностью. Выпуклую область  $\mathcal{D}$  (см., например, рис. 1) левой комплексной полуплоскости  $\mathbb{C}^-$ , можно определить следующим образом:

$$(4) \quad \mathcal{D} = \{z \in \mathbb{C}^- : L + zM + \bar{z}M^T\},$$

где  $L = L^T$  и  $M$  – действительные матрицы,  $z$  – комплексная переменная, а  $\bar{z}$  – комплексно сопряженная. Область  $\mathcal{D}$ , которая описывается линейным матричным неравенством, называется ЛМН-областью. Значения матриц  $L$  и  $M$  определяют конкретный вид выпуклой области на комплексной плоскости (см. [9] или, например, [4]).

Сформулируем задачу синтеза регулятора с расположением полюсов замкнутой системы в заданной области при минимально

возможном значении  $H_\infty$ -нормы передаточной функции замкнутой системы.

Дан стандартный объект управления (1) в виде передаточных функций, которому в пространстве состояний соответствует система уравнений (3). Для заданной ЛМН-области, описываемой системой ЛМН вида (4), требуется найти динамический регулятор полного порядка в форме наблюдателя

$$(5) \quad \begin{aligned} \dot{x}_c &= A_c x_c + B_c y, \\ u &= C_c x_c + D_c y, \end{aligned}$$

обеспечивающий

- минимально возможное значение  $\gamma$  для  $H_\infty$ -нормы передаточной функции замкнутой системы (2)

$$(6) \quad \|T_{wz}(P, K_\infty)\|_\infty < \gamma;$$

- размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы  $T_{wz}$  в заданной выпуклой области  $\mathcal{D}$ .

## 1.2. АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ЗАКОНА УПРАВЛЕНИЯ

Решение  $H_\infty$ -субоптимальной задачи (6) для заданной  $\gamma$  при ограничении на размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы в заданной ЛМН-области (4) (см., например, рис. 1) сводится к решению системы ЛМН (7-9) [9].

Система ЛМН имеет следующий вид

$$(7) \quad \begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} \geq 0,$$

$$(8) \quad \left[ L \otimes \begin{bmatrix} R & I \\ I & S \end{bmatrix} + M \otimes \Phi + M^T \otimes \Phi^T \right] < 0,$$

$$(9) \quad \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{21}^T \\ \Psi_{21} & \Psi_{22} \end{bmatrix} < 0,$$

где

$$\Phi = \begin{bmatrix} AR + B_2C_c & A + B_2D_cC_2 \\ \hat{A}_c & SA + \hat{B}_cC_2 \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{11} = \begin{bmatrix} AR + RA^T + B_2\hat{C}_c + \hat{C}_c^T B_2^T & B_1 + B_2D_cD_{21} \\ (B_1 + B_2D_cD_{21})^T & -\gamma I \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{21} = \begin{bmatrix} \hat{A}_c + (A + B_2D_cC_2)^T & SB_1 + \hat{B}_cD_{21} \\ C_1R + D_{12}\hat{C}_c & D_{11} + D_{12}D_cD_{21} \end{bmatrix},$$

$$\Psi_{22} = \begin{bmatrix} A^T S + SA + \hat{B}_cC_2 + C_2^T \hat{B}_c^T & (C_1 + D_{12} + D_cC_2)^T \\ C_1 + D_{12}D_cC_2 & \gamma I \end{bmatrix},$$

где  $I$  – единичная матрица соответствующей размерности. Матрицы  $A$ ,  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $D_{11}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{21}$  и  $D_{22}$  определяются из  $(A, B, C, D)$ -представления стандартного объекта (3).

Символ  $\otimes$  означает кронекерово произведение матриц. Для произвольных матриц  $A$  и  $B$  элементы матрицы  $C = A \otimes B$  имеют вид  $c_{ij} = a_{ij}B$ .

Регулятор вида (5) определяется минимальным значением  $\gamma = \gamma_{min}$ , при котором существуют две симметричных матрицы  $R, S$  и матрицы  $\hat{A}_c, \hat{B}_c, \hat{C}_c, D_c$ . Если ЛМН (7-9) разрешимы, то матрицы регулятора (5)  $A_c$ ,  $B_c$  и  $C_c$  определяются из решения системы линейных уравнений

$$(10) \quad \begin{aligned} \hat{C}_c &= C_c M^T + D_c C_2 R, \\ \hat{B}_c &= NB_c + SB_2 D_c, \\ \hat{A}_c &= NA_c M^T + NB_c C_2 R + \\ &+ SB_2 C_c M^T + S(A + B_2 D_c C_2)R, \end{aligned}$$

где  $M$  и  $N$  – любые квадратные матрицы такие, что  $MN^T = I - RS$ .

Минимизация по  $\gamma$  при ограничении в виде линейных матричных неравенств (7-9) проводится численно с помощью методов внутренней точки, описанных в работах [20, 21].

## 2. Динамическая модель котельной установки

Линейная динамическая модель энергетической котельной установки в отклонениях в окрестности номинального режима работы, полученная на основе процедуры идентификации, приведена в работе [29]. В ней показано, что в окрестности номинального режима работы котла линейная динамическая модель энергетической котельной установки достаточно хорошо аппроксимирует переходные процессы, происходящие в реальной системе. Матричную передаточную функцию между векторным входом  $u$  модели котельной установки и ее выходом  $y_0$  обозначим через  $G(s)$ , т. е.  $y_0(s) = G(s)u(s)$ . Координатами входного вектора  $u$  являются отклонения от номинального режима: расхода питательной воды (кг/с) – координата  $u_1$ ; расхода топлива (кг/с) – координата  $u_2$ , расхода впрыскиваемого пароохладителя (кг/с) – координата  $u_3$ . Координатами вектора выходных переменных  $y_0$  являются отклонения от номинального режима – уровня воды в барабане котла (м) –  $y_{01}$ , давления перегретого пара (МПа) –  $y_{02}$  и температуры перегретого пара –  $y_{03}$  (°C).

Передаточная функция  $G(s)$  имеет вид

$$(11) \quad G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & G_{23}(s) \\ G_{31}(s) & G_{32}(s) & G_{33}(s) \end{bmatrix},$$

где

$$G_{11}(s) = \frac{(-0,16s^2 + 0,052s + 0,0014) \times 10^{-3}}{s^2 + 0,0168s},$$

$$G_{12}(s) = \frac{(3,1s - 0,032) \times 10^{-3}}{s^2 + 0,0215s}, \quad G_{13}(s) = 0,$$

$$G_{21}(s) = \frac{-0,0395 \times 10^{-3}}{s + 0,018}, \quad G_{22}(s) = \frac{2,51 \times 10^{-3}}{s + 0,0157},$$

$$G_{23}(s) = \frac{(0,588s^2 + 0,2015s + 0,0009) \times 10^{-3}}{s^2 + 0,0352s + 0,000142},$$

$$G_{31}(s) = \frac{(-1,18s + 0,139) \times 10^{-3}}{s^2 + 0,01852s + 0,000091},$$

$$G_{32}(s) = \frac{0,448s + 0,0011}{s^2 + 0,0127s + 0,000095},$$

$$G_{33}(s) = \frac{0,582s - 0,0243}{s^2 + 0,1076s + 0,00104}.$$

Линеаризация производилась при следующих значениях входных и выходных переменных:

$$u_0 = \begin{bmatrix} u_{10} \\ u_{20} \\ u_{30} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 40,68 \\ 2,102 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad y_{00} = \begin{bmatrix} y_{010} \\ y_{020} \\ y_{030} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,0 \\ 6,45 \\ 466,7 \end{bmatrix}.$$

Линейную динамическую модель  $G(s)$  будем называть объектом управления. Объекту управления (11) соответствует (с точностью до преобразования подобия) в пространстве состояний система линейных дифференциальных уравнений вида

$$(12) \quad \begin{aligned} \dot{x}_g &= A_g x_g + B_g u \\ y_0 &= C_g x_g + D_g u, \end{aligned}$$

где  $x_g$  –  $n$ -мерное внутреннее состояние объекта. Матрицы объекта  $A_g, B_g, C_g, D_g$  имеют соответствующие размерности.

### **3. Задача синтеза регулятора для управления котельной установкой**

В этом разделе формулируются требования к замкнутой системе управления котельной установкой, ставится оптимизационная задача и приводится процедура синтеза робастного регулятора. Задача  $H_\infty$ -оптимизации формулируется в терминах передаточной функции замкнутой системы, выраженной через стандартный объект. В оптимизационной постановке задачи синтеза требования к замкнутой системе формализуются в виде формы ЛМН и формирующих функций.

#### **3.1. ТРЕБОВАНИЯ К ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ**

Сформулируем требования к проектируемой замкнутой системе. Для заданной модели объекта управления в виде многомерной передаточной функции  $G(s)$  замкнутая система с регулятором  $K(s)$  в виде динамической обратной связи (см. рис. 3) по измеряемому выходу  $y$  должна гарантировать устойчивость и для управляемого выхода  $y_0$  обеспечивать

- переходные процессы, близкие к апериодическим;
- время регулирования, не превышающее заданного значения;
- заданный уровень подавления шумов и возмущений;
- высокий запас устойчивости замкнутой системы;
- робастность к неопределенности в модели объекта управления.

#### **3.2. ПОСТРОЕНИЕ СТАНДАРТНОГО ОБЪЕКТА**

Рассмотрим структурную схему замкнутой системы с объектом управления  $G(s)$  и регулятором  $K_\infty(s)$  в обратной связи, представленную на рис. 3. На рисунке также изображены префильтр  $W_1(s)$  и постфильтр  $W_2(s)$ , участвующие при синтезе регулятора  $K(s)$ .



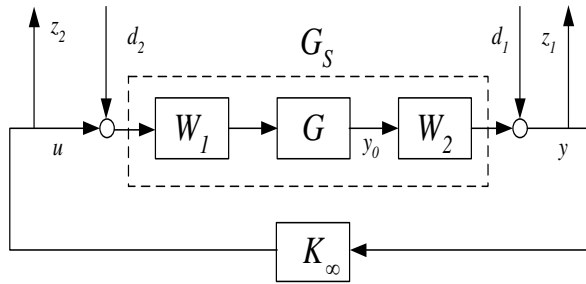


Рис. 3. Замкнутая система управления котельной установкой

Замкнутой системе управления соответствует стандартный объект управления  $P(s)$  вида

(13)

$$\begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y(s) \\ u(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_y & W_2GW_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} W_2GW_1 \\ I_u \end{bmatrix} u(s),$$

$$y(s) = \begin{bmatrix} I_y & W_2GW_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1(s) \\ d_2(s) \end{bmatrix} + W_2GW_1 u(s),$$

где  $I_y$  и  $I_u$  – единичные матрицы соответствующей размерности.

Соответствующие блоки матрицы передаточной функции стандартного объекта (13) имеют вид

$$P_{11}(s) = \begin{bmatrix} I_y & W_2GW_1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad P_{12}(s) = \begin{bmatrix} W_2GW_1 \\ I_u \end{bmatrix},$$

$$P_{21}(s) = \begin{bmatrix} I_y & W_2GW_1 \end{bmatrix}, \quad P_{22}(s) = W_2GW_1.$$

Передаточная функция замкнутой системы с объектом управления  $G$  и регулятором  $K$  в обратной связи от всех внешних

входов  $w = [d_1^T, d_2^T]^T$  к выходам замкнутой системы  $z = [y^T, u^T]^T$  определяется формулой

(14)

$$T_{wz}(G_s, K_\infty) = \begin{bmatrix} (I - G_s K_\infty)^{-1} & (I - G_s K_\infty)^{-1} G_s \\ K_\infty (I - G_s K_\infty)^{-1} & K_\infty (I - G_s K_\infty)^{-1} G_s, \end{bmatrix}$$

где  $G_s = W_2 G W_1$  – обобщенный объект.

Описанию стандартного объекта в виде передаточных функций (13) в пространстве состояний соответствует  $(A, B, C, D)$ -представление вида (3).

$(A, B, C, D)$ -представление стандартного объекта включает в себя матрицы не только  $(A, B, C, D)$ -представления номинального объекта  $G$  в виде (12), но и формирующих функций  $W_1$  и  $W_2$ . Вектор внутреннего состояния  $x$  стандартного объекта (3) включает в себя векторы состояния номинального объекта  $x_g$  (см. (12)) и формирующих функций  $W_1$  и  $W_2$ .

### 3.3. ОПТИМИЗАЦИОННАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СИНТЕЗА УПРАВЛЕНИЯ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКОЙ

Для обеспечения заданных требований, указанных в п. 3.1, сформулируем математическую постановку задачи синтеза регулятора  $K(s)$  как задачу  $H_\infty$ -оптимизации.

Дан стандартный объект управления (13) в виде передаточных функций, которому в пространстве состояний соответствует система уравнений вида (3).

Для заданных

- ЛМН-области  $\mathcal{D}$  (см. рис. 1), описываемой системой ЛМН (4)
- и формирующих функций  $W_1$  и  $W_2$

требуется синтезировать регулятор  $K(s)$  в виде динамической обратной связи по измеряемому выходу  $y$

$$u(s) = K(s)y(s),$$

обеспечивающий

- минимально возможное значение  $\gamma$  для  $H_\infty$ -нормы передаточной функции замкнутой системы  $T_{wz}$  (14)  
(15) 
$$\|T_{wz}(G_s, K_\infty)\|_\infty = \gamma_{min};$$
- размещение полюсов передаточной функции замкнутой системы  $T_{wz}$  в заданной ЛМН-области;
- частотные ограничения на максимальные  $\bar{\sigma}(GK)$  и минимальные  $\underline{\sigma}(GK)$  сингулярные числа разомкнутой системы.

Регулятор  $K(s)$  ищется в пространстве состояний в форме наблюдателя в виде (5).

### 3.4. ПРОЦЕДУРА СИНТЕЗА РЕГУЛЯТОРА

Процедура синтеза регулятора состоит из следующих шагов:

**Шаг 1. Формирование заданных требований.** Задаются

- ЛМН-область, в которой требуется разместить полюса замкнутой системы,
- префильтр  $W_1(s)$  и постфильтр  $W_2(s)$  и формируется обобщенный объект  $G_s = W_2GW_1$ , который задает желаемые сингулярные значения разомкнутой системы.

**Шаг 2. Оценка совместимости требований.** Решается задача  $H_\infty$ -оптимизации (15) для обобщенного объекта  $G_s$  при ограничении на расположение полюсов замкнутой системы в заданной ЛМН-области на основе системы линейных матричных неравенств (7-9).

- Если решения симметричных матриц  $R, S$  и матриц  $\hat{A}_c, \hat{B}_c, \hat{C}_c, D_c$  системы ЛМН (7-9) не существуют, то возвращаемся к шагу 1.

- Если решения  $R, S, \hat{A}_c, \hat{B}_c, \hat{C}_c, D_c$  существуют, то из системы линейных уравнений (10) вычисляются матрицы  $A_c, B_c, C_c$  регулятора  $K_\infty$  и определяется величина максимального запаса робастной устойчивости  $\varepsilon_{max} = \gamma_{min}^{-1}$  (см. [19] или, например, [4]).

Если величина максимального запаса робастной устойчивости  $0,25 < \varepsilon_{max} < 0,5$  (см., например, [30]), то переходим к шагу 3, иначе возвращаемся к шагу 1.

### Шаг 3. Синтез регулятора при заданных ограничениях.

Искомый регулятор определяется в виде  $K = W_1 K_\infty W_2$ .

Теоретическим базисом для  $H_\infty$ -формирования контура является то, что  $K_\infty$  не модифицирует желаемую форму контура существенным образом на низких и высоких частотах, если достигнутая  $\varepsilon_{max}$  является слишком маленькой [33].

Существенную роль в процедуре синтеза играет выбор формирующих передаточных функций (префильтр  $W_1$  и постфильтр  $W_2$ ). Выбор которых является достаточно сложной задачей, так как обобщенный ("формирующий") объект  $G_s$  задает желаемое поведение сингулярных чисел (требуемое разработчиком) разомкнутой системы во всем диапазоне частот. Величина  $H_\infty$ -нормы замкнутой системы равная  $\gamma_{min}$  характеризует меру близости (точность приближения) между сингулярными числами желаемой разомкнутой системы  $\sigma(W_2 G W_1)$  и полученной в результате синтеза  $K_\infty$  регулятора  $\sigma(G_s K_\infty)$  (см. [19]). В децибелах соотношение между ними имеет вид

$$\sigma(G_s K_\infty) = \sigma(W_2 G W_1) \pm \gamma_{opt} \text{ (db)}.$$

На графиках (в логарифмическом масштабе) соответствующие сингулярные числа синтезированной разомкнутой системы находятся в некоторой полосе с шириной  $20 \log \gamma_{min}$  относительно соответствующих сингулярных чисел обобщенного объекта.

Таким образом,  $H_\infty$ -метод формирования контура с ограничением на расположение полюсов замкнутой системы в заданной ЛМН-области позволяет синтезировать робастный регулятор с учетом требований к замкнутой системе во всем диапазоне частот. Плавный переход вокруг частоты среза контура (средние частоты) с наклоном, близким к  $-20$  дБ на декаду, задается видом ЛМН-область с малым значением колебательности. Это обеспечивает переходные процессы, близкие к аperiodическим в соответствии с заданной величиной колебательности, а время переходного процесса определяется заданной степенью устойчивости. Высокий коэффициент усиления на низких частотах и малый коэффициент усиления на высоких частотах определяются выбором соответствующих префильтра  $W_1$  и постфильтра  $W_2$ .

Необходимо отметить, что решения системы линейных матричных неравенств, а следовательно, и регулятор, будут существовать тогда и только тогда, когда при выбранных векторах управления и измерения расположение полюсов в заданной области возможно с удовлетворением всех предъявляемых требований к замкнутой системе. Таким образом, совместимость требований к замкнутой системе определяется существованием решений системы линейных матричных неравенств (7-9).

#### **4. Результаты синтеза**

В работе для данного объекта синтезируется два регулятора. Первый является регулятором полного порядка и получен на основе методики, описанной в п. 3.4. Второй получен в результате редукции синтезированного регулятора полного порядка  $K_\infty$  на основе метода сбалансированного отсечения [26]. В русскоязычной литературе данный метод описан в [3].

##### **4.1. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАННЫХ ТРЕБОВАНИЙ К ЗАМКНУТОЙ СИСТЕМЕ**

Рассмотрим синтез регулятора полного порядка. В методике, изложенной в п. 3.4 у разработчика системы управления в

процессе итерационной процедуры синтеза имеется возможность варьировать форму ЛМН-области и формирующие функции: префильтр  $W_1(s)$  и постфильтр  $W_2(s)$ . Форма ЛМН-области задает требования к замкнутой системе, а с помощью формирующих функций задаются требования к разомкнутой системе в виде  $W_2(s)G(s)W_1(s)$ .

Обычно в качестве предварительного этапа перед процедурой синтеза регулятора производится масштабирование исходной (номинальной) модели объекта (см., например, [30]). Масштабирование производится для того, чтобы сделать влияние различных входных сигналов на выход величинами одного порядка. Коэффициенты первой строки и первого столбца модели котельной установки (11) имеют малые значения и почти не сравнимы с коэффициентами других строк и столбцов. В данной работе проводится процедура масштабирования, а именно: выходная переменная  $y_{01}$  увеличивается в 100 раз,  $y_{02}$  – в 1000 раз, а  $y_{03}$  остается без изменений. Входная переменная  $u_1$  увеличивается в 10 раз, а  $u_2$  и  $u_3$  остаются без изменений. Тогда масштабированные матрицы имеют вид

$$S_2 = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 1000 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad S_1 = \begin{bmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Очевидно, что масштабированные матрицы в дальнейшем используются для построения исходного регулятора  $K = S_1 W_1 K_\infty W_2 S_2$ , так как выбор  $W_1$  и  $W_2$  производится для масштабированной модели  $G = S_2 G_{nom} S_1$ . Уточним, что передаточная функция  $G_{nom}(s)$  исходной номинальной модели котельной установки задается видом (11). Графики сингулярных чисел заданной номинальной  $G_{nom}$  и масштабированной моделей  $G = S_2 G_{nom} S_1$  приведены на рис. 4. Значения минимальных и максимальных сингулярных чисел на всех частотах для масштабированной модели отличаются примерно на 30 дБ, в то

время как для исходной номинальной модели разница достигает примерно 80 дБ.

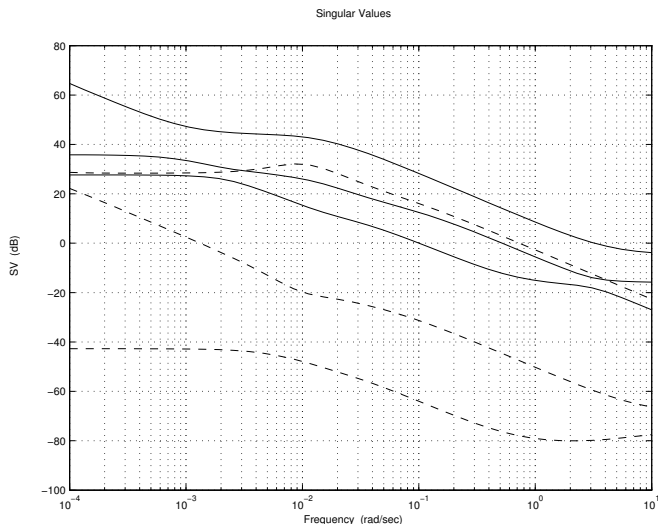


Рис. 4. Сингулярные значения номинальной (пунктирная) и масштабированной (сплошная) моделей котельной установки

Формирование обобщенного объекта  $G_s(s)$  производится с помощью префильтра  $W_1(s)$  и постфильтра  $W_2(s)$  для масштабированной модели. Так как размерность управления  $u$  и выхода объекта  $y_0$  равна 3, то размерность матричных передаточных функций префильтра  $W_1(s)$  и постфильтра  $W_2(s)$  также равна 3. Таким образом, каждая из формирующих функций представляется матричной передаточной функцией вида

$$W_i = \begin{bmatrix} W_{i11} & W_{i12} & W_{i13} \\ W_{i21} & W_{i22} & W_{i23} \\ W_{i31} & W_{i32} & W_{i33} \end{bmatrix}, \quad i = 1, 2.$$

В статье формирующие передаточные функции  $W_1$  и  $W_2$

выбирается диагонального вида

$$W_1(s) = \begin{bmatrix} \frac{0,01}{s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{0,01}{s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{0,01}{s} \end{bmatrix}, \quad W_2(s) = \begin{bmatrix} 0,1 & 0 & 0 \\ 0 & 0,1 & 0 \\ 0 & 0 & 0,1 \end{bmatrix}.$$

Отметим, что матричные передаточные функции префилтра и постфилтра имеют достаточно простой вид. Это существенно отличает  $H_\infty$ -метод формирования контура с ограничением расположение полюсов от классического  $H_\infty$ -метода формирования контура [19].

В качестве ЛМН-области для данного объекта управления была выбрана область, которая образована пересечением двух полуплоскостей и сектора на комплексной плоскости (см. рис. 1). Заданная степень устойчивости была выбрана равной  $\eta = 0,001$ . Ее определяет первая полуплоскость  $Re(\lambda) < -0,001$ . Вторая полуплоскость  $Re(\lambda) > -0,5$  ограничивает максимальную угловую частоту собственных колебаний  $\omega_0 = 0,5 * tg\varphi = 0,5$  замкнутой системы. Сектор с углом  $\varphi = \frac{\pi}{4}$  ограничивает коэффициент демпфирования (параметр затухания) величиной не менее  $\zeta = \cos\varphi = 0,707$ .

Решение задачи минимизации  $H_\infty$ -нормы передаточной функции замкнутой системы (14) производится численно в системе Matlab с использованием программы hinfmix из пакета решения линейных матричных неравенств LMI Control Toolbox [15].

#### 4.2. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ СИНТЕЗА

Рассмотрим частотные свойства замкнутой системы с регуляторами полного порядка и редуцированным. В результате процедуры синтеза регулятора полного порядка величина  $\gamma_{min}$ , равная  $H_\infty$ -норме передаточной функции замкнутой системы, имеет значение 2,994. Следовательно, величина максимального запаса робастной устойчивости равна  $\varepsilon_{max} = \gamma_{min}^{-1} = 1/2,994 = 0,334 > 0,25$ . Приведенные значения характеризуют вполне



удовлетворительную оценку совместимости требований между качеством переходных процессов и робастной устойчивостью замкнутой системы, а также близость сингулярных чисел обобщенного объекта и разомкнутой системы с синтезированным регулятором полного порядка. Это подтверждается графиками сингулярных чисел обобщенного объекта и разомкнутой системы с регулятором полного порядка, приведенных на рис. 5.

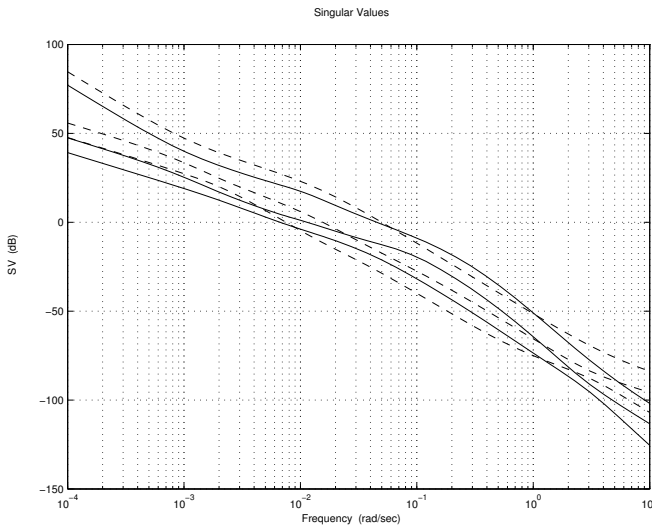


Рис. 5. Сингулярные значения обобщенного объекта (пунктирная) и разомкнутой системы с регулятором полного порядка (сплошная)

Регулятор полного порядка  $K_{\infty}$ , полученный в результате синтеза, имеет размерность (размерность матрицы состояния  $A_c$ ), равную 16. Он редуцируется с использованием метода сбалансированного отсечения до 6 порядка.

Сингулярные числа разомкнутой системы с редуцированным регулятором 6-го порядка и регулятором полного порядка приведены на рис. 6. Как видно из графиков, редукция регулятора полного порядка приводит к незначительному изменению свойств

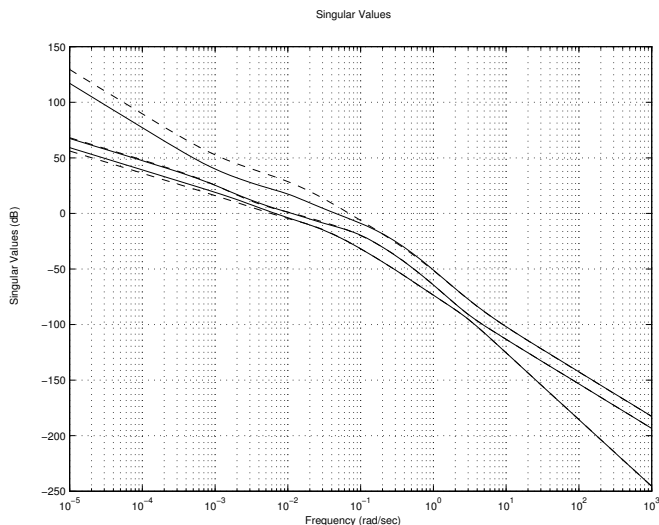


Рис. 6. Сингулярные числа разомкнутой системы с редуцированным регулятором (пунктирная) и регулятором полного порядка (сплошная).

разомкнутой системы, в основном в области низких частот. Максимальное отличие достигает примерно 10 дБ. В области высоких частот графики практически совпадают. Это говорит о том, что редукция  $K_\infty$  регулятора не влияет на подавление высокочастотных шумов и не ухудшает робастных свойств  $K_\infty$  регулятора.

Для обеспечения качества функционирования замкнутой системы (подавление возмущений, уменьшение ошибки слежения) необходимо обеспечивать малые значения максимальных сингулярных чисел функции чувствительности  $S = (I - GK)^{-1}$ , а для обеспечения робастности системы необходимо обеспечивать малые значения максимальных сингулярных чисел функции дополнительной чувствительности  $T = GK(I - GK)^{-1}$  (см., например, [14]). На рис. 7 для замкнутой системы с регулятором полного порядка сингулярные числа функции чувствительности  $\sigma(S(j\omega))$  показаны сплошной

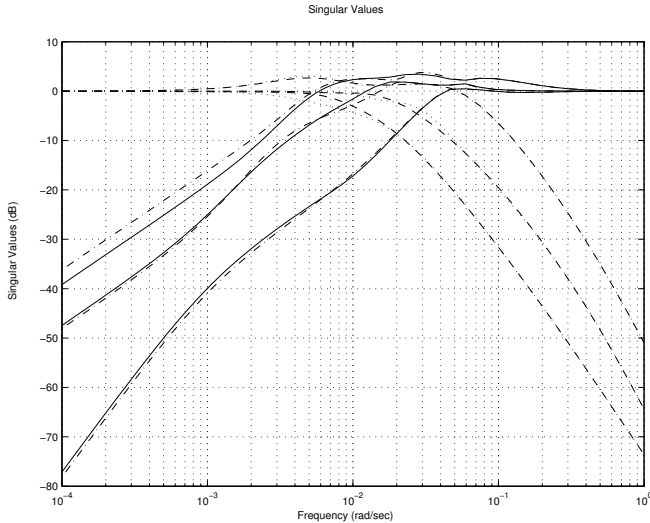


Рис. 7. Сингулярные значения функции чувствительности и дополнительной чувствительности с редуцированным регулятором и регулятором полного порядка

линией, а функции дополнительной чувствительности  $\sigma(T(j\omega))$  – штриховой линией. Для замкнутой системы с редуцированным регулятором сингулярные числа функции чувствительности  $S = (I - GK_{red})^{-1}$  показаны штрих-пунктирной линией, а сингулярные числа функции дополнительной чувствительности  $T = GK_{red}(I - GK_{red})^{-1}$  – пунктирной.

Согласно рис. 7 максимальные сингулярные числа функции чувствительности  $\bar{\sigma}(S(j\omega))$  с редуцированным регулятором и регулятором полного порядка имеют наклон примерно 20 дБ/дек на низких частотах и остаются меньше 0 дБ для частот меньших, чем  $0,5 \times 10^{-2}$  рад/с приблизительно. Для редуцированного регулятора наблюдается незначительное ухудшение  $\bar{\sigma}(S(j\omega))$  (ухудшение подавления возмущений) примерно на 3 дБ.

Максимум  $\bar{\sigma}(S(j\omega))$  составляет приблизительно 4 дБ и достигается в районе  $0,3 \times 10^{-2}$  рад/с. Малая величина пика  $\bar{\sigma}(S(j\omega))$  характеризует удовлетворительное подавление

возмущений на низких частотах и низкую колебательность или высокий параметр затухания замкнутой системы.

Анализ сингулярных значений функции дополнительной чувствительности  $\sigma(T(j\omega))$  показывает похожие результаты. Графики максимальных сингулярных чисел функции дополнительной чувствительности  $\bar{\sigma}(T(j\omega))$  с редуцированным и регулятором полного порядка практически совпадают. Величины максимальных сингулярных чисел  $\bar{\sigma}(T(j\omega))$  меньше 0 дБ на частотах, больших примерно  $0,5 \times 10^{-1}$  рад/с. Это означает, что для частот выше данной будет обеспечено подавление высокочастотных внешних возмущений, в частности, шумов измерения. Отметим, что максимум  $\bar{\sigma}(T(j\omega))$  также составляет примерно 4 дБ. Незначительная величина пика  $\bar{\sigma}(T(j\omega))$  характеризует высокое демпфирование замкнутой системы и робастность относительно мультипликативной неопределенности в модели объекта.

Рассмотрим запасы устойчивости по фазе и амплитуде замкнутой системы с синтезированным регулятором полного порядка и редуцированным регулятором. Для анализа многомерной системы использована программа LOOPMARGIN из пакета Robust Control Toolbox [6] системы Matlab. Программа LOOPMARGIN позволяет определять запасы устойчивости по амплитуде и фазе как для изолированных каналов, так и для всей многосвязной системы по алгоритму, представленному в [7]. В нашем случае многомерная передаточная функция разомкнутой системы имеет три входа и три выхода. Приведем результаты анализа для системы с регулятором полного порядка. Для изолированных каналов запасы устойчивости по амплитуде и фазе составляют по первому выходу 36 дБ по амплитуде и 53 град. по фазе, по второму выходу – 23 дБ по амплитуде и 56 град. по фазе, по третьему выходу – 12 дБ по амплитуде и 69 град. по фазе. Для многосвязной системы гарантированный запас устойчивости по амплитуде составляет 8,85 дБ, а по фазе – 50 градусов.

Для системы с редуцированным регулятором запасы по

первому выходу составляют 35 дБ по амплитуде и 52 град. по фазе, по второму выходу – 22 дБ по амплитуде и 57 град. по фазе, по третьему выходу – 11 дБ по амплитуде и 86 град. по фазе. Для многосвязной системы гарантированный запас устойчивости по амплитуде составляет 8,6 дБ, а по фазе – 49 градусов. Таким образом, редуцированный регулятор с точки зрения запасов по амплитуде и фазе практически не отличается от регулятора полного порядка.

Рассмотрим корневые свойства замкнутой системы с регулятором полного порядка, полученной в результате синтеза. Корни характеристического полинома или собственные значения матрицы состояния  $A$  ( $A, B, C, D$ )-представления передаточной функции замкнутой системы  $T_{wz}$  с данным регулятором имеют следующие значения:

$$\begin{aligned}\lambda_1 &= -4,61 \times 10^{-3}, \\ \lambda_2 &= -4,64 \times 10^{-3}, \\ \lambda_{3,4} &= (-5,34 \pm 3,84i) \times 10^{-3}, \\ \lambda_{5,6} &= (-6,41 \pm 5,41i) \times 10^{-3}, \\ \lambda_{7,8} &= (-8,98 \pm 3,34i) \times 10^{-3}, \\ \lambda_9 &= -9,62 \times 10^{-3}, \\ \lambda_{10,11} &= (-7,99 \pm 6,41i) \times 10^{-3}, \\ \lambda_{12,13} &= (-10,04 \pm 2,62i) \times 10^{-3} \\ \lambda_{14} &= -1,17 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{15,16} &= (-13,60 \pm 9,34i) \times 10^{-3}, \\ \lambda_{17} &= -1,73 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{18} &= -1,74 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{19,20} &= (-19,10 \pm 3,99i) \times 10^{-3} \\ \lambda_{21} &= -2,56 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{22} &= -3,02 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{23} &= -3,27 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{24} &= -4,11 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{25,26} &= (-3,83 \pm 2,88i) \times 10^{-2}, \\ \lambda_{27} &= -7,79 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{28} &= -8,16 \times 10^{-2}, \\ \lambda_{29} &= -1,03 \times 10^{-1},\end{aligned}$$

$$\lambda_{30,31} = (-48,00 \pm 1,94i) \times 10^{-2}$$

$$\lambda_{32} = -4,83 \times 10^{-1}.$$

Как видно из величин собственных значений полученная степень устойчивости составляет  $\eta = 0,00461 > 0,001$ , минимальный параметр затухания равен  $\zeta = 0,764 > 0,707$  для  $\lambda_{5,6} = (-6,41 \pm 5,41i) \times 10^{-3}$ , а частоты собственных колебаний не превышают  $\omega_0 = 2,88 \times 10^{-2} < 0,5$  для  $\lambda_{25,26} = (-3,83 \pm 2,88i) \times 10^{-2}$ .

Таким образом, частотный и корневой анализы позволяют сделать вывод о том, что замкнутые системы с редуцированным регулятором и регулятором полного порядка обеспечивают: переходные процессы, близкие к апериодическим; заданное время переходного процесса; заданный уровень подавления шумов и внешних возмущений; высокий запас устойчивости замкнутой системы; робастность к неопределенности в модели объекта управления.

## 5. Выводы

В работе исследуется возможность применения  $H_\infty$ -метода формирования контура с ограничением на расположение полюсов замкнутой системы в заданной ЛМН-области на комплексной плоскости для управления котельной установкой. Требования к замкнутой системе задаются формой ЛМН-области и формирующими передаточными функциями, а именно: префильтром и постфильтром. Выбор матричных передаточных функций префильтра и постфильтра существенно упрощается по сравнению с классическим  $H_\infty$ -методом формирования контура. Решение задачи синтеза робастного регулятора производится с использованием аппарата линейных матричных неравенств. Синтезированы регулятор полного порядка и редуцированный регулятор. Оба регулятора для замкнутой системы гарантируют приемлемое качество переходных процессов и грубость к неопределенности в модели котельной установки.

## Литература

1. БАЛАНДИН Д.В., КОГАН М.М. *Синтез законов управления на основе линейных матричных неравенств.* – М.: Физматлит, 2007.
2. БЕСЕКЕРСКИЙ В.А., ПОПОВ Е.П. *Теория систем автоматического регулирования.* – М.: Наука, 1972.
3. БОЙЧЕНКО В.А., КУРДЮКОВ А.П., ТИМИН В.Н., ЧАЙКОВСКИЙ М.М. *Некоторые методы синтеза регуляторов пониженного порядка и заданной структуры // Управление большими системами.* – 2007. – Выпуск 19. – С. 23-126.
4. КУРДЮКОВ А.П., ТИМИН В.Н.  *$H_\infty$  управление энергетической системой в аварийном режиме. Ч.1. Теоретические основы синтеза робастных  $H_\infty$ -регуляторов // Проблемы управления.* – 2009. – №1. – С. 8-17.
5. КУРДЮКОВ А.П., ТИМИН В.Н.  *$H_\infty$  управление энергетической системой в аварийном режиме. Ч.2. Синтез робастного регулятора для управления энергетической системой // Проблемы управления.* – 2009. – №2. – С. 14-23.
6. BALAS G., CHIANG R., PACKARD A., SAFONOV M. *Robust Control Toolbox.* Natick. – MA: The MathWorks, 2006.
7. BLIGHT J.D., DAILEY R.L., GANGSASS D. *Practical control law design for aircraft using multivariable techniques // International Journal of Control.* – 1994. – Vol. 59. – №1. – Pp. 93-137.
8. BOYD S., EL GHAOUI L., FERON E., BALAKRISHNAN V. *Linear Matrix Inequalities in Systems and Control Theory.* Philadelphia: SIAM books, 1994.
9. CHILALI M., GAHINET P.  *$H_\infty$  Design with Pole Placement Constraints: An LMI Approach // IEEE Trans. AC.* – 1996. – Vol. 41. – №3. – Pp. 358-367.
10. CHILALI M., GAHINET P., APKARIAN P. *Robust Pole*

- Placement in LMI Regions* // IEEE Trans. AC. – 1999. – Vol. 44. – №12. – Pp. 2257-2270.
11. CORI R., MAFFEZZONI C. *Practical optimal control of a drum boiler power plant* // Automatica. – 1984. – Vol. 20. – Pp. 163-173.
  12. DOYLE J.C., GLOVER K., KHARGONEKAR P.P., FRANCIS B.A. *State-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems* // IEEE Trans. Automat. Contr. – 1989. – Vol.34. – №8. – Pp. 831-847.
  13. DOYLE J.C., STEIN G. *Multivariable Feedback Design: Concepts for a Classical/Modern Synthesis* // IEEE Trans. Auto. Control. – 1981. – Vol. AC-26. – №1. – Pp. 4-16.
  14. FRANCIS B.A. *A Course in  $H_\infty$  Control Theory*. Lecture Notes in Control and Information Sciences. – N.-Y.: Springer-Verlag, 1987.
  15. GAHINET P., APKARIAN P. *A Linear Matrix Inequality Approach to  $H_\infty$  Control* // Int. J. Robust Non. Contr. – 1994. – Vol. 4. – Pp. 421-448.
  16. KHARGONEKAR P.P., ROTEA M.A. *Mixed  $H_2/H_\infty$  Control: A Convex Optimization Approach* // IEEE Trans. Aut. Contr. – 1991. – Vol. 39. – Pp. 824-837.
  17. KWON W.H., KIM S.W., PARK P.G. *On the multivariable robust control of a boiler-turbine system* // in Proc. IFAC Symp. Power Syst. Power Plant Contr. Seoul. Korea. – 1989. – Pp. 219-223.
  18. MCFARLANE D.C., GLOVER K. *Robust Controller Design Using Normalized Coprime Factorization Description*. – N.-Y.: Springer-Verlag, 1990.
  19. MCFARLANE D.C., GLOVER K. *A Loop Shaping Design Procedure Using  $H_\infty$  Synthesis* // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1992. – Vol. 37. – №6. – Pp. 759-769.
  20. NEMIROVSKII A., GAHINET P. *Interior Point Polynomial Algorithms in Convex Programming: Theory and Applications* // SIAM Studies Appl. – 1994. – Math. – Vol. 13.
  21. NESTEROV Y., NEMIROVSKII A. *The Projective Method*



- for Solving Linear Matrix Inequalities* // Math. Programming Series B. – 1997. – Vol. 77. – Pp. 163-190.
22. PAL B., CHAUDHURI B. *Robust Control in Power Systems*. N.-Y.: Springer Science+Business Media Inc, 2005. – Pp. 140-150.
  23. PAPAGEORGIU G. *Robust Control System Design:  $H_\infty$  Loop Shaping and Aerospace Applications*. PhD thesis. University of Cambridge. Department of Engineering, 1998.
  24. PELLEGRINETTI G., BENTSMAN J.  *$H_\infty$  controller design for boilers* // Int. J. Robust Nonlinear Contr. – 1994. – Vol. 4. – Pp. 645-671.
  25. PETROVIX T.B., IVEZIC D.D., DEBELJKOVIC D.L.J. *Robust IMC controllers for a solid-fuel boiler* // Eng. Simulation. – 2000. – Vol. 17. – №2. – Pp. 211-224.
  26. SAFONOV, M.G., CHIANG R.Y. *Schur Method for Balanced Model Reduction* // IEEE Trans. on Automat. Contr. – 1989. – Vol. 34. – №7. – Pp. 729-733.
  27. SCHERER C., GAHINET P., CHILALI M. *Multiobjective Output-Feedback Control via LMI Optimization* // IEEE Trans. AC. – 1997. – Vol. 42. – Pp. 896-911.
  28. SKOGESTAD S., POSTLETHWAITE I. *Multivariable Feedback Control*. – London: John Wiley and Sons, 2001.
  29. TAN W., MARQUEZ H.J., CHEN T. *Multivariable Robust Controller Design for Boiler System* // IEEE Transactions on Automatic Control System Technology. – 2002. – Vol.10. – №5. – Pp. 735-742.
  30. TAN W., CHEN T. *Robust Controller Design and PID Tuning for Multivariable Processes*. <http://coblitz.codeen.org:3125/citeseer.ist.psu.edu/cache/papers/cs/28407/>  
[http://zSzzSznyquist.ee.ualberta.ca/zSztchenzSz.zSzpaperszSzatan\\_ajc02.pdf/robust-controller-design-and.pdf](http://zSzzSznyquist.ee.ualberta.ca/zSztchenzSz.zSzpaperszSzatan_ajc02.pdf/robust-controller-design-and.pdf)  
(дата обращения 23.08.2008).
  31. VIDYASAGAR M. *A Coprime Factorization Approach*. – USA, Cambridge: MIT Press, 1985.

32. ZAMES G. *Feedback and optimal sensitivity: model reference transformations, multiplicative seminorms, and approximate inverses* // IEEE Trans. Auto. Control. – 1981. – Vol. AC-26. – №2. – Pp. 301-320.
33. ZHOU K., DOYLE J.C., GLOVER K. *Robust and Optimal Control*. – New Jersey: Prentice-Hall, 1996.

## $H_\infty$ ROBUST CONTROLLER DESIGN FOR BOILER SYSTEM

**Alexander Kurdjukov**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, doctor of technical sciences, professor (akurd@ipu.ru).

**Victor Timin**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, candidate of technical sciences, senior staff scientist, (timin.victor@rambler.ru.) (Moscow, Profsoyuznaya st., 65).

*Abstract: This paper is devoted to the problem of the boiler system control. This problem solution is based on the technique of closed-loop pole placement in given LMI region of the complex plain, as well as  $H_\infty$  loop shaping using LMI. Closed-loop performance requirements are established in form of both frequency-domain constraints onto the singular values of open-loop transfer function and constraints onto closed-loop pole placement at the complex plain. The designed full-order  $H_\infty$  controller is reduced via balanced truncation technique.*

Keywords: boiler system control,  $H_\infty$  control theory, linear matrix inequality (LMI),  $H_\infty$  loop shaping, closed-loop pole placement in LMI region, controller reduction.

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии Б.Т. Поляком*

УДК 681.513.54, 681.518, 621.64/.69  
ББК 32.965, 31.391

## УПРЕЖДАЮЩЕЕ УПРАВЛЕНИЕ ПО КРИТЕРИЮ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ В ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Шнайдер Д. А.<sup>1</sup>

(Южно-Уральский государственный университет,  
Челябинск)

*В статье приведена постановка задачи упреждающего управления теплоэнергетическими системами металлургического производства по критериям энергетической эффективности. Предложен подход к решению поставленной задачи с использованием динамических оценок показателей энергетической эффективности на основе метода экспоненциальной фильтрации. Приведен пример упреждающего управления системой пароснабжения металлургического предприятия с учетом критерия энергетической эффективности.*

Ключевые слова: энергетическая эффективность, упреждающее управление, теплоэнергетическая система.

### **1. Введение**

Теплоэнергетические системы металлургических предприятий представляют собой сложные производственные комплексы, включающие подсистемы выработки, распределения, аккумулярования и потребления топливно-энергетических ресурсов (ТЭР). Режимы работы данных подсистем определяются режи-

---

<sup>1</sup> Шнайдер Дмитрий Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры автоматики и управления (shnayder@ait.susu.ac.ru).

мами работы технологического оборудования основного металлургического производства и характеризуются существенными изменениями выработки и потребления ТЭР. Вместе с тем объемы потребления ТЭР напрямую определяют энергоемкость металлургического производства, а технические параметры ТЭР – качество выпускаемой продукции. Отсюда важной практической задачей является организация эффективного управления теплоэнергетическими системами металлургического предприятия, учитывающего динамику процессов выработки, распределения, аккумулирования и потребления ТЭР, а также влияние отклонений параметров ТЭР на качество пускаемой продукции.

Ведущую роль в повышении энергетической эффективности в теплоэнергетических системах металлургического производства играют автоматизированные системы управления. Базовым требованием к построению подобных систем является формирование текущей информации о технико-экономических параметрах технологических процессов. Перспективным подходом, позволяющим значительно повысить эффективность автоматизированного управления технологическими процессами по сравнению с существующим уровнем, является введение упреждающего управления по критериям энергетической эффективности и реализация на его основе соответствующих систем автоматизированного управления.

Поиску и реализации новых эффективных подходов и решений к энергосберегающему управлению сложными производственными процессами и системами были посвящены труды многих ученых [1, 3-5]. Однако методология упреждающего управления по критериям энергетической эффективности в теплоэнергетических системах металлургического производства в настоящее время недостаточно разработана, что и определяет актуальность данной работы.

## 2. Постановка задачи

Актуальной задачей автоматизированного управления технологическими процессами (ТП) является учет энергетической эффективности выпуска продукции. Другими словами, в АСУ помимо задач непосредственного управления ТП должен быть реализован контур управления по текущему значению показателя энергетической эффективности ТП.

В качестве показателя энергетической эффективности ТП обычно используется энергоемкость выпуска продукции, определяющая затраты ТЭР на единицу выпускаемой продукции, либо прямой показатель энергетической эффективности:

$$(1) \quad \varphi = \frac{P}{W},$$

где  $P$  – объем выпущенной продукции;  $W$  – соответствующий объем потребленных ТЭР.

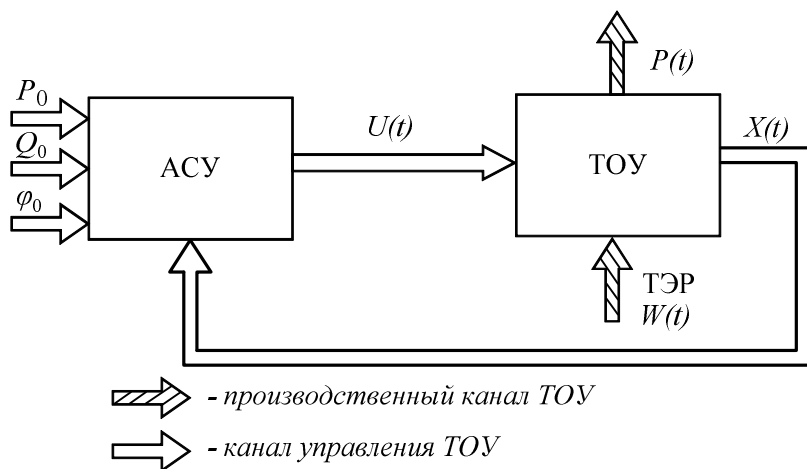


Рис. 1. Поточная модель АСУ с учетом энергетической эффективности выпуска продукции

Обобщенная схема АСУ технологическим объектом управления (ТОУ) с учетом энергетической эффективности выпуска продукции представлена на рис. 1. Здесь АСУ формирует управляющие воздействия  $U(t)$  на ТОУ, исходя из текущего состояния ТОУ  $X(t)$ , заданной производственной программы выпуска продукции  $P_0$ , требуемых показателей качества выпускаемой продукции  $Q_0$  и требуемой энергетической эффективности выпуска продукции  $\varphi_0$ .

Критерии управления ТОУ могут быть записаны следующим образом:

$$(2) \min [P(t) - P_0],$$

$$(3) \max [\varphi(t)],$$

при ограничениях:

$$(4) Q(t) \geq Q_0, \varphi(t) \geq \varphi_0.$$

Одной из проблем обеспечения максимума энергетической эффективности (3) при оперативном управлении ТОУ является оценка текущего значения  $\varphi(t)$ . Дело в том, что реальные ТП характеризуются существенной динамикой процессов потребления ТЭР  $W(t)$  и выработки продукции  $P(t)$ , определяющей значительное запаздывание во времени по производственному каналу ТОУ (см. рис. 1). В связи с этим прямой расчет  $\varphi(t)$  по формуле (1) с подстановкой текущих  $P(t)$  и  $W(t)$  приведет к некорректной постановке задачи, при которой, к примеру, подача импульса ТЭР на входе ТОУ приведет к мнимому резкому уменьшению энергетической эффективности, так как соответствующий объем продукции еще не будет выработан.

Поэтому для оперативного управления энергетической эффективностью ТОУ в рамках АСУ, приведенной на рис. 1, необходима упреждающая оценка показателя  $\varphi'(t)$ , рассчитанная для синхронизированных по времени значений потребления ТЭР и выпуска продукции, т. е.

$$(5) \varphi'(t) = \frac{P(t + \tau_{np})}{W(t)}.$$

где  $\tau_{np}$  – интервал упреждения, определяемый запаздыванием в ТП;  $P(t + \tau_{np})$  – прогнозируемое значение выпуска продукции в результате потребления текущего объема ТЭР  $W(t)$ .

Одним из подходов к решению рассматриваемой задачи управления ТОУ (2)-(5) является использование для управления динамической модели объекта. Для этого могут быть применены различные методы, например, метод модельного прогнозирующего управления (МПУ) [1]. Суть метода МПУ состоит в решении задачи оптимального управления ТОУ на каждом шаге работы системы управления на основе прогноза поведения объекта, рассчитанного на модели. Последовательное решение задачи на множестве шагов позволяет получить оптимальное управление ТОУ в соответствии с заданным критерием управления и ограничениями.

Однако для рассматриваемого класса крупномасштабных распределенных нелинейных динамических систем, к которым относятся теплоэнергетические системы металлургических предприятий, построение точной математической модели является крайне сложной и объемной задачей. Вместе с тем, погрешность в оценке  $\varphi(t)$  даже в 1-2% при управлении энергетической эффективностью крупных ТОУ влечет за собой значительные экономические потери. Поэтому применение методов, основанных на построении математической модели ТОУ, для решения поставленной крупномасштабной задачи управления является ограниченным.

Корректное решение рассматриваемой задачи управления требует получения оперативных оценок показателей эффективности с высокой точностью, либо путем прямых приборных измерений, либо косвенно на основе динамических оценок. При этом усреднение по времени динамических оценок показателей должно обеспечивать сведение теплоэнергетического баланса ТОУ за отчетный период (обычно, месяц), т. е. фактическое среднее значение показателя энергетической эффективности  $\varphi^{cp}$  за отчетный период  $T_n$ , полученное по приборным данным на входе и выходе ТОУ, должно быть равно среднему значению

оценки данного показателя с погрешностью  $\delta$ , меньшей или равной заданному значению  $\varepsilon$ :

$$(6) \quad \varphi^{cp} = \frac{1}{T_n} \int_0^{T_n} \varphi'(t) dt \pm \delta, \quad |\delta| \leq \varepsilon.$$

Это условие является обязательным требованием к приборным средствам измерения расхода ТЭР.

Таким образом, общая задача АСУ теплоэнергетическими системами металлургического производства может быть поставлена следующим образом: обеспечить управление ТООУ, удовлетворяющее критериям (2), (3) при ограничениях (4), на основе динамической оценки показателя энергетической эффективности (5), удовлетворяющей требованию (6) несмещенности оценки.

Ключевым вопросом в решении поставленной задачи, рассматриваемым далее, является метод получения динамической оценки энергетической эффективности (5) с учетом требования (6).

### **3. Динамическая оценка показателей энергетической эффективности на основе метода экспоненциальной фильтрации**

Реальные производственные теплоэнергетические системы характеризуются существенной для управления динамикой, в том числе наличием временных задержек, связанных с транспортировкой ТЭР или продукции. В качестве примера, иллюстрирующего суть предлагаемого подхода, положим, что передаточная функция производственного канала ТООУ (вход – ТЭР, выход – продукция) состоит из энергетической характеристики ТП  $F(A)$ , где  $A = A(t)$  – множество параметров ТП, в общем случае зависящих от времени, и линейного динамического оператора  $L\{\}$ , представленного для наглядности в виде звена чистого запаздывания (см. рис. 2,а).



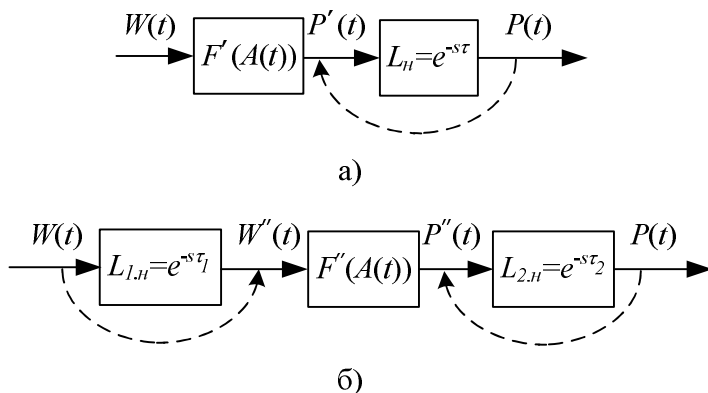


Рис. 2. Операция динамического приведения:  
 $L_n, L_{1,n}, L_{2,n}$  – динамические операторы;  
 $\tau, \tau_1, \tau_2$  – интервалы времени запаздывания

Тогда для примера на рис. 2,а упреждающая оценка (5) будет иметь вид:

$$(7) \quad \dot{\varphi}'(t) = \frac{L_n^{-1}\{P(t)\}}{W(t)} = \frac{e^{+s\tau} \cdot P(t)}{W(t)} = \frac{P'(t)}{W(t)} = F'(A(t)),$$

где  $P'(t) = e^{+s\tau} \cdot P(t)$  – упреждающая оценка  $P(t)$ , полученная путем обратного динамического приведения выхода ТОУ ко входу.

Для распределенных ТОУ, характеризующихся значительным временным запаздыванием, может применяться операция частичного динамического упреждения, проиллюстрированная на рис. 2,б. Здесь упреждающая оценка показателя (5) образуется путем частичного динамического приведения выхода и входа ТОУ, т. е.:

$$(8) \quad \ddot{\varphi}''(t) = \frac{L_{2,n}^{-1}\{P(t)\}}{L_{1,n}\{W(t)\}} = \frac{e^{+s\tau_2} \cdot P(t)}{e^{-s\tau_1} \cdot W(t)} = \frac{P''(t)}{W''(t)} = F''(A(t)),$$

где  $P''(t) = e^{+s\tau_2} \cdot P(t)$  – упреждающая оценка  $P(t)$ , полученная путем частичного обратного динамического приведения выхода ТОУ, а  $W''(t) = e^{-s\tau_1} \cdot W(t)$  – упреждающая оценка  $W(t)$ , полученная

путем частичного прямого динамического приведения входа ТОО к некоторой промежуточной точке в структуре динамической модели ТОО.

Как следует из (7) и (8), полученные упреждающие оценки  $\varphi'(t)$ ,  $\varphi''(t)$  соответствуют текущим значениям функциональных зависимостей  $F(A(t))$ ,  $F''(A(t))$ , представляющих собой энергетические характеристики ТОО. Таким образом, суть операции динамического приведения состоит в восстановлении текущего значения фактической энергетической характеристики ТОО на основании данных текущего потребления ТЭР и выпуска продукции без непосредственного измерения технологических параметров  $A(t)$  и построения полной математической модели ТОО.

Обратим внимание, что рассмотренные выше динамические операторы  $L_n$ ,  $L_{1,n}$ ,  $L_{2,n}$  являются нормированными, т. е. имеют единичные коэффициенты усиления. Поэтому для интервала времени наблюдения такого, что  $T_n \gg \tau_1$  и  $T_n \gg \tau_2$ , условие несмещенности оценки (6) будет выполняться.

Согласно (7), (8) получение упреждающих оценок требует обращения динамических операторов. Сложность такого обращения состоит в необходимости вычисления производных сигналов из-за наличия временных задержек и превышения порядка числителя над порядком знаменателя обращенной передаточной функции. Далее рассмотрим подход к получению обратных динамических операторов на основе метода экспоненциальной фильтрации [2].

Построение экспоненциальных фильтров базируется на представлении информационной составляющей фильтруемого сигнала в виде ряда:

$$(9) \quad x_0(t - \lambda) = \sum_i a_i(t) \varphi_i(\lambda),$$

где  $\varphi_i(\lambda)$  – координатные функции ряда;  $a_i(t)$  – проекции сигнала;  $\lambda$  – интервал ретроспективы.

В роли координатных функций могут быть использованы различные функции: гармонические, степенные, ортогональные

полиномы и др. В рассматриваемом далее случае использования степенных функций информационную составляющую сигнала можно представить в виде:

$$(10) \quad x_0(t - \lambda) = \sum_i a_i(t) \lambda^i.$$

В данном случае ряд (10) можно сопоставить с разложением функции  $x_0(t - \lambda)$  в ряд Тейлора в точке  $t$  – текущий момент времени:

$$(11) \quad x_0(t - \lambda) = \sum_i \frac{(-1)^i x_0^{(i)}(t)}{i!} \lambda^i,$$

где  $x_0^{(i)}(t)$  – производные  $i$ -го порядка сигнала  $x_0(t)$

Сравнение (10) и (11) позволяет вывести формулу:

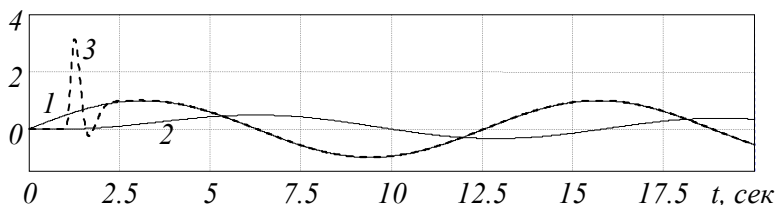
$$(12) \quad x_0^{(i)}(t) = (-1)^i i! a_i(t), \quad i = 0, 1, \dots, n.$$

Соотношение (12) показывает связь между проекциями информационного сигнала и его производными. Проекции  $a_i(t)$  информационного сигнала определяются согласно [2]. Полученные подобным образом производные могут использоваться для построения обратных динамических операторов.

В качестве примера на рис. 3 приведены результаты обращения передаточной функции вида:

$$(13) \quad W(s) = \frac{e^{-s}}{5s + 1}$$

при помощи степенного экспоненциального фильтра, полученные с использованием моделирующей программы Vissim.



*Рис. 3. Пример обращения динамического оператора:*

*1 – входной сигнал; 2 – сигнал на выходе передаточной функ-*

ции;

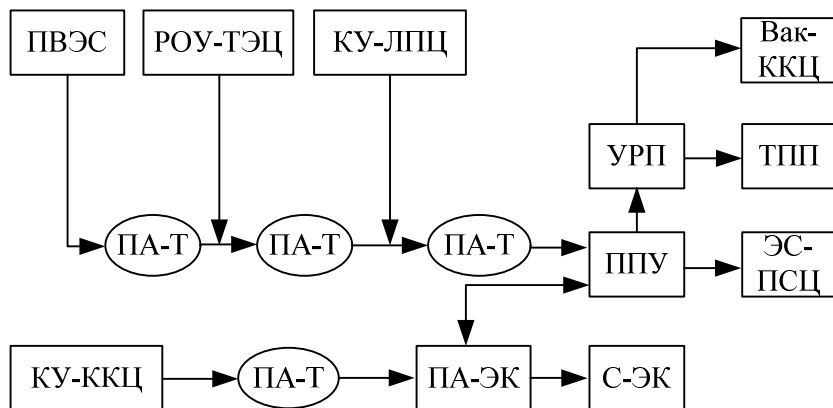
3 – выходной сигнал, динамически приведенный ко входу

В приведенном на рис. 3 примере обращение динамического оператора (13) реализовано с использованием двух последовательно включенных экспоненциальных фильтров: первый фильтр (3-го порядка) выполняет временной сдвиг входного сигнала, второй фильтр (1-го порядка) осуществляет обращение знаменателя передаточной функции (13).

Таким образом, приведенный выше пример показывает принципиальную возможность использования метода экспоненциальной фильтрации для обращения динамических операторов и упреждающей оценки показателей энергетической эффективности ТП.

#### **4. Пример упреждающего управления системой пароснабжения металлургического предприятия с учетом критерия энергетической эффективности**

Типовая структурная схема системы пароснабжения крупного металлургического предприятия приведена на рис. 4.



*Рис. 4. Типовая структурная схема системы пароснабжения металлургического предприятия*

Система пароснабжения на рис. 4 включает в себя:

– источники пара: паровоздушная электростанция (ПВЭС), редуционно-охлаждающая установка теплоэлектростанции (РОУ-ТЭЦ), паровые котлы утилизаторы нагревательных печей листопрокатного цеха (КУ-ЛПЦ), паровые котлы утилизаторы кислородно-конверторного цеха (КУ-ККЦ);

– потребителей пара: установка вакуумирования стали кислородно-конверторного цеха (Вак-ККЦ), электростанция паросилового цеха (ЭС-ПСЦ), прочие технологические потребители пара (ТПП);

– систему аккумулирования и распределения пара: паровые трубопроводы, обладающие вследствие протяженности собственной аккумулирующей способностью (ПА-Т), пароводяные аккумуляторы энергокорпуса (ПА-ЭК), пароперегревающая установка (ППУ), предохранительная свеча энергокорпуса (С-ЭК), узел распределения пара (УРП),

Задачей энергоэффективного управления рассматриваемой системой пароснабжения является обеспечение номинального режима пароснабжения ЭС-ПСЦ, соответствующего максимальной выработке электроэнергии, а также требуемых параметров пара на Вак-ККЦ и ТПП, при минимизации потерь пара через свечу энергокорпуса. В основе решения данной задачи лежит создание распределенной автоматизированной системы управления (АСУ), формирующей упреждающие управляющие воздействия для систем автоматического регулирования (САР) нижнего уровня в соответствии с заданными критериями управления:

$$(14) \min [D_{ЭС}(t) - D_{ЭС}^0],$$

$$(15) \min [D_{Св}(t)]$$

при ограничении

$$(16) D_{ВАК}(t) \geq D_{ВАК}^0,$$

где  $D_{ЭС}(t)$ ,  $D_{ЭС}^0$  – фактический и требуемый номинальный расход пара на ЭС-ПСЦ, соответствующий максимальной выработке электроэнергии;  $D_{Св}(t)$  – расход (потери) пара на свечу в

энергокорпусе;  $D_{\text{ВАК}}(t)$ ,  $D_{\text{ВАК}}^0$  – фактический и минимальный допустимый расход пара на Вак-ККЦ.

На рис. 5 в качестве примера представлена структурная схема потоковой модели рассматриваемой системы пароснабжения. Здесь  $L_i$  – динамические операторы вида (13). Пунктирными линиями показаны вводимые контуры упреждающего управления на основе использования обратных динамических операторов  $L_i^{-1}$ .

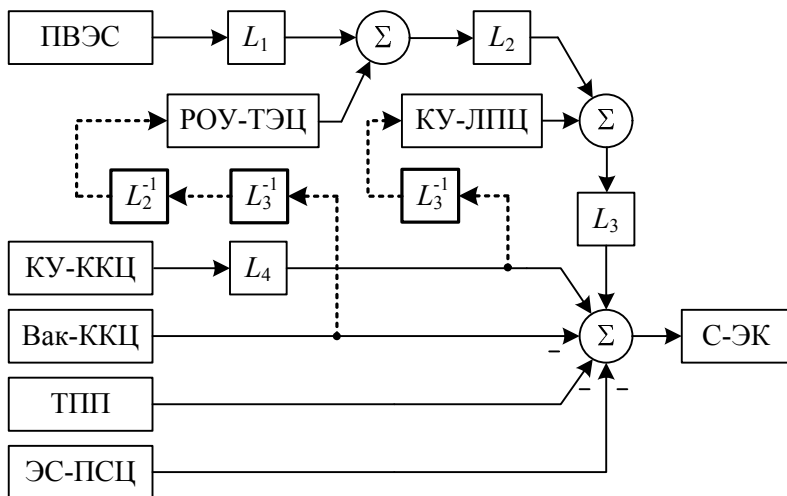


Рис.5. Структурная схема потоковой модели системы пароснабжения с контурами упреждающего управления по возмущениям от КУ-ККЦ и Вак-ККЦ

Результаты моделирования рассматриваемой системы приведены на рис. 6.

Так, на рис. 6,а показаны возмущающие воздействия для АСУ пароснабжения в виде изменений выработки пара КУ-ККЦ и потребления пара Вак-ККЦ. Возмущающие воздействия приняты в виде синусоидальных сигналов, являющихся огибающими реальными процессами в системе.

На рис. 6,б показаны суммарные расходы пара от источников ПВЭС, РОУ-ТЭЦ и КУ-ЛПЦ в исходной системе, обеспечивающей выполнение только технологического критерия управления (14) при ограничении (16) (график 3), и в системе реализующей дополнительно управление по критерию энергетической эффективности (15) (график 4). На рис. 6,в показаны соответствующие расходы (потери) пара на свечу в энергокорпусе для указанных систем.

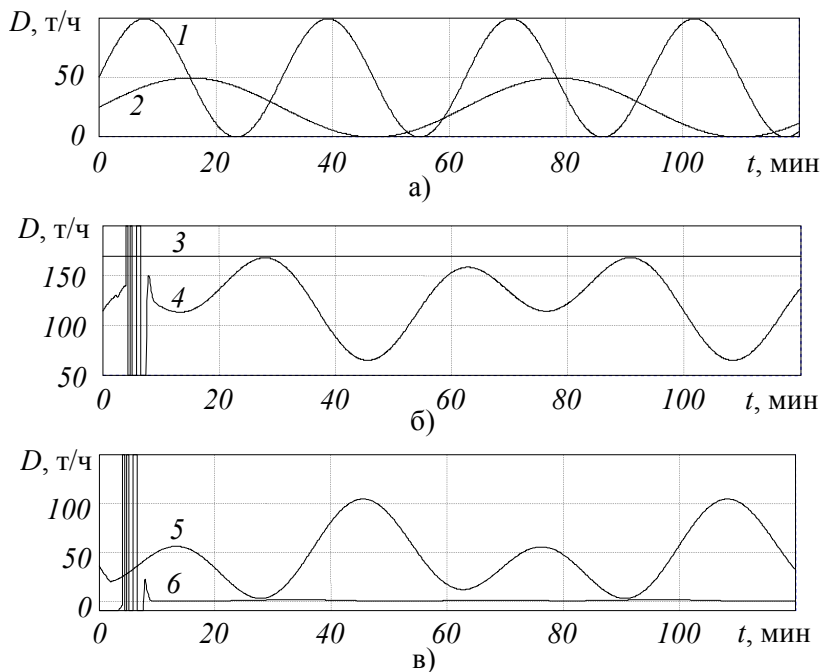


Рис. 6. Результаты моделирования: 1 – выработка пара КУ-ККЦ; 2 – расход пара на Вак-ККЦ; 3, 4 – подача пара от ПВЭС, РОУ-ТЭЦ и КУ-ЛПЦ в исходной системе и системе с упреждающим управлением, соответственно; 5, 6 – потери пара на свечу в исходной системе и системе с упреждающим управлением, соответственно.

Как видно из рис. 6,в, при отсутствии управления по критерию (15) потери пара составляют до 100 т/ч (график 5). Введение упреждающего управления по критерию (15), обеспечивающего изменение подачи пара от источников в зависимости от расходов пара на Вак-ККЦ и КУ-ККЦ, позволяет практически исключить потери пара (график 6).

В рассматриваемом примере вариации расхода пара на Вак-ККЦ демпфируются за счет РОУ-ТЭЦ, а вариации расхода пара на КУ-ККЦ – за счет КУ-ЛПЦ. При этом требуемые значения подачи пара от РОУ-ТЭЦ и КУ-ЛПЦ определяются следующими формулами:

$$(17) D_{РОУ-ТЭЦ}^*(t) = L_2^{-1} \left\{ L_3^{-1} \left\{ D_{Вак-ККЦ}(t) \right\} \right\},$$

$$(18) D_{КУ-ЛПЦ}^*(t) = D_6 - L_3^{-1} \left\{ D_{КУ-ККЦ}(t) \right\},$$

где  $D_6$  – базовое значение требуемой подачи пара от КУ-ЛПЦ, соответствующее среднему значению выработки пара КУ-ККЦ.

Обращение динамических операторов осуществляется на основе применения экспоненциальных фильтров, рассмотренных выше.

Таким образом, в приведенном методическом примере применение упреждающего управления по критерию энергетической эффективности позволило практически устранить потери пара на свечу, составляющие до 100 т/ч, при обеспечении требуемых расходов пара у других потребителей, что свидетельствует о высокой энергетической эффективности и целесообразности внедрения подобного управления в реальных системах пароснабжения металлургических предприятий.

## 5. Выводы

1. Теплоэнергетические системы металлургических предприятий представляют собой сложные производственные комплексы, включающие подсистемы выработки, распределения, аккумулирования и потребления ТЭР, в значительной степени определяющие энергоемкость и качество выпускаемой продукции. Поэтому важной практической задачей является введение

228



оперативного управления теплоэнергетическими системами металлургического предприятия в рамках АСУ ТП с учетом критериев энергетической эффективности.

2. В статье приводится общая постановка задачи и подход к реализации упреждающего управления теплоэнергетическими системами металлургического производства по критериям энергетической эффективности на основе обращения динамических операторов методом экспоненциальной фильтрации. Приведенные результаты моделирования обращения типового динамического оператора, включающего апериодическое звено и звено чистого запаздывания, показывают принципиальную возможность использования метода экспоненциальной фильтрации для решения подобных задач.

3. На основе разработанного подхода предложена постановка задачи и приведены основные формульные зависимости для реализации упреждающего управления пароснабжением металлургического предприятия с учетом критерия энергетической эффективности. Результаты моделирования на примере потоковой динамической модели показали высокую эффективность и целесообразность реализации предложенного упреждающего управления в системах пароснабжения металлургического производства.

### **Литература**

1. ГУДВИН Г. К. *Проектирование систем управления* / Г. К. Гудвин, С. Ф. Греббе, М. Э. Сальгадо. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004.
2. КАЗАРИНОВ Л. С., ГОРЕЛИК С. И. *Прогнозирование случайных колебательных процессов на основе метода экспоненциального сглаживания* // Автоматика и телемеханика. – 1994. – №10. – С. 27-34.
3. КОЛЕСНИКОВ А. А. *Синергетические методы управления сложными системами: энергетические системы* /

- А. А. Колесников, Г. Е. Веселов, А. Н. Попов, А. А. Кузьменко, М. Е. Погорелов, И. В. Кондратьев. – М.: КомКнига, 2006.
4. ЛИСИЕНКО В. Г. *Хрестоматия энергосбережения*: Справочное издание: в 2-х книгах / В.Г. Лисиенко, Я.М. Щелочков, М.Г. Ладыгичев; под ред. В.Г. Лисиенко. – М.: Теплоэнергетик, 2002.
  5. МАТВЕЙКИН В. Г. *Теоретические основы энергосберегающего управления динамическими режимами установок производственно-технического назначения* / В. Г. Матвейкин, Д. Ю. Мурромцев. – М.: Машиностроение-1, 2007.
  6. СУЛТАНГУЗИН И. А. *Научно-технические основы моделирования и оптимизации энерготехнологической системы металлургического комбината*: Дис. д-ра техн. наук. – М.: РГБ, 2005. – 414 с.

## **ENERGY EFFICIENCY CRITERION FEEDFORWARD CONTROL OF HEAT-AND-POWER ENGINEERING SYSTEMS IN METALLURGICAL PRODUCTION**

**Dmitry Shnayder**, South Ural State University, Chelyabinsk, Cand.Sc., assistant professor (shnayder@ait.susu.ac.ru).

*Abstract: The problem is set of energy efficiency criterion feedforward control of heat-and-power engineering systems in metallurgical production. The suggested problem solution approach uses exponential filtration method based on dynamic estimations of energy efficiency parameters. The article contains an example of energy efficiency criterion feedforward control of a steam supply system in a metallurgical plant.*

Keywords: energy efficiency, feedforward control, heat-and-power engineering system.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии М.В. Губко*

УДК 629.7.017.1  
ББК 39.62

## ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ ВЫВЕДЕНИИ НА ОРБИТУ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ГРУЗОВ

**Андриенко А. Я.<sup>1</sup>, Тропова Е. И.<sup>2</sup>, Чадаев А. И.<sup>3</sup>**  
(Учреждение Российской академии наук  
Институт проблем управления  
им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)

*Приводятся отдельные результаты решения проблем управления, возникших при введении в эксплуатацию РН «Союз-2» с повышенными габаритами головных обтекателей.*

Ключевые слова: система управления расходом топлива, крупногабаритные головные обтекатели, ветровые возмущения, равномерные ошибки измерения.

### **1. Введение**

Совершенствование космических ракет-носителей (РН) проводится не только в части повышения их грузоподъёмности, надёжности и экологичности выведения, но и в части расширения допустимых габаритных размеров выводимых на целевые орбиты полезных нагрузок (ПН). При этом соответствующим образом деформируется геометрическая конфигурация РН – с увеличением габаритных размеров головных обтекателей (ГО) для ПН. Конкретно, при модернизации космических средств выведения среднего класса типа «Союз» [4] (с переходом от РН «Союз-ФГ» к «Союз-2») максимальный диаметр ГО был увеличен с 3000 мм до 3700 мм (и более) при сохранении размеров

---

<sup>1</sup> Анатолий Яковлевич Андриенко, заведующий лабораторией, доктор технических наук, профессор (vladguc@ipu.rssi.ru).

<sup>2</sup> Елена Ивановна Тропова, научный сотрудник (тел. (495) 334-88-71).

<sup>3</sup> Александр Иванович Чадаев, старший научный сотрудник, кандидат технических наук (тел. (495) 334-88-71).

других частей РН (в частности, диаметра 2660 мм блока последней ступени).

Возросшая «парусность» головных частей РН доставляет дополнительные трудности в работе

1) системы угловой стабилизации (СУС) полётом РН – в основном на атмосферном участке полёта I ступени;

2) системы управления расходом топлива (СУРТ) – из-за усиления порождаемых действием СУС колебаний поверхностей жидкого топлива в тех уровнемерах СУРТ, которые смещены относительно оси бака [1].

В статье представлены результаты исследований, направленных преимущественно на преодоление трудностей, возникших в работе СУРТ модернизированной РН «Союз-2».

## **2. История вопроса**

1. Спорадические превышения ошибками измерения рассогласования уровней компонентов топлива проектно-предельных их значений в районе максимальных аэродинамических напоров отмечались ещё в начале 70-х гг. прошлого века при пусках РН «Восток». Подобного же рода возрастание (не более чем на  $\sim 0,5$  с) уровнемерных временных ошибок измерения из-за действия ветровых возмущений на автомат угловой стабилизации РН проявлялось (не чаще, чем в 5% пусках) и при эксплуатации РН «Молния» и «Союз», где оно практически не сказывалось на конечной точности управления расходом топлива.

2. В конце 2006 г. были успешно осуществлены три эксплуатационных пуска РН «Союз-2» [5] с обновлёнными ГО:

27 октября на заданную орбиту выведен тяжёлый метеорологический спутник «Метоп-А»;

24 декабря выведен первый из орбитальной группировки связных космических аппаратов «Меридиан»;

27 декабря – французский научный спутник «Коро».

В каждом из этих пусков проявился в той или иной мере эффект возрастания уровнемерных ошибок  $\Delta t_{ji}$  измерения рассогласования объёмов компонентов топлива – возрастания, обусловленного действием ветровых возмущений на автомат угло-

вой стабилизации РН. Наиболее заметным этот эффект был в последнем из проведённых в 2006 г. пусков: «ветровая» составляющая ошибки измерения рассогласования объёмов почти втрое превысила уровень «штатных» (проектных) ошибок измерения, а главное, заметно расширился временной интервал действия этой составляющей ошибки, так что почти вдвое сократилась длительность конечного интервала времени регулирования опорожнения баков относительно свободного от проявлений «ветровой» составляющей уровневых ошибок (ср. рис. 1 с рис. 2), где  $i$  – номер чувствительного элемента (ч.э.).

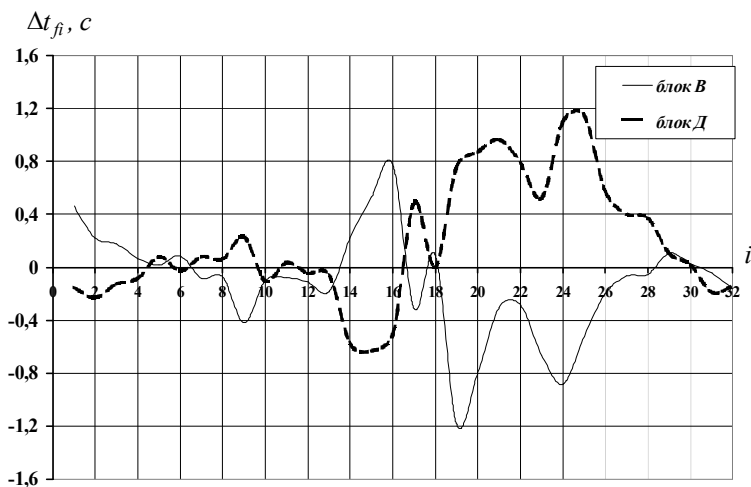


Рис. 1. Ошибки действия уровневых ч.э. в боковых блоках В и Д при выведении КА «Коро» 27.12.06 г.

Поэтому при пуске РН «Союз-2» с КА «Коро» погрешность внутриблочной синхронизации опорожнения баков окислителя и горючего одного из боковых блоков РН более чем вдвое превысила допустимое по ТЗ значение.

**Примечание.** Представляемые в статье результаты анализа пусков РН получены на основе использования методологии [2].

Выявленное возрастание ошибок измерения рассогласования объёмов компонентов топлива однозначно связывается с

влиянием боковых перегрузок РН на положение уровня жидкости в уровнемере горючего ББ, смещённом от оси бака (на 300 мм). Эти перегрузки оказываются тем сильнее, чем больше размеры ГО.

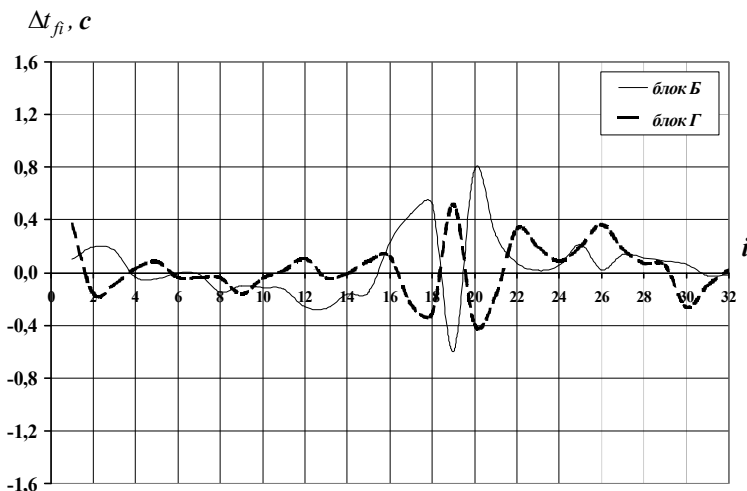


Рис. 2. Ошибки действия уровнемерных ч.э. в боковых блоках Б и Г при выведении КА «Метон» 27.10.06 г.

### 3. Постановка задачи

Выявленное по результатам пусков РН «Союз-2» в 2006г. существенное возрастание погрешностей действия уровнемеров СУРТ не сказалось на конечных результатах выведения КА – в силу располагаемого резерва в грузоподъёмности РН. Но следует иметь в виду, что:

1) уже в последующем пуске – при выведении изделия 14Ф137 – такого резерва не будет;

2) в перспективе совместной (с французским концерном) эксплуатации РН «Союз-2» [3] необходимо обеспечить дополнительное повышение надёжности выведения КА (при пусках с космодрома Гвианского космического центра (ГКЦ) в Куру).

В соответствии с положениями 1) и 2) формируется двух-этапная постановка следующей задачи.

1. В экстренном порядке *скорректировать параметрическое обеспечение* (ПО) работы СУРТ с тем, чтобы гарантировать выполнение требований по точности синхронизации опорожнения баков окислителя и горючего боковых блоков РН «Союз-2» в экстремальных условиях проявления «ветровой» составляющей уровнемерных ошибок.

2. К началу запусков РН «Союз-2» с космодрома ГКЦ в Курру *скорректировать программно-математическое обеспечение* (ПМО) работы СУРТ с тем, чтобы в тех же экстремальных условиях проявлений уровнемерных ошибок существенно снизить, в обеспечение надёжности работы жидкостных ракетных двигателей, отклонения (от номинала) соотношения расходов компонентов топлива.

#### **4. Решение задачи**

*Этап 1.* Представленные головной организацией-разработчиком РН «Союз-2» данные о предельных значениях той составляющей уровнемерных ошибок измерения объёмов *горючего* ББ, что обусловлена действием ветровых возмущений на автомат угловой стабилизации РН «Союз-2», приведены в графическом виде на рис. 3. Конечное влияние ветровых возмущений на погрешности действия уровнемеров *окислителя* ББ, расположенных строго по продольным осям баков ББ, оказалось пренебрежимо малым.

Полученные с учетом этих данных результаты статистического моделирования работы СУРТ с программно-математическим и параметрическим обеспечениями, использовавшимися при пуске РН «Союз-2» в 2006 г., представлены на рис. 4 в виде графика, выделенного жирной линией. Из этого графика следует, что в пусках РН «Союз-2», проводимых без доработок ПМО или ПО СУРТ (либо доработок автомата угловой стабилизации изделия), вполне возможны двукратные пре-

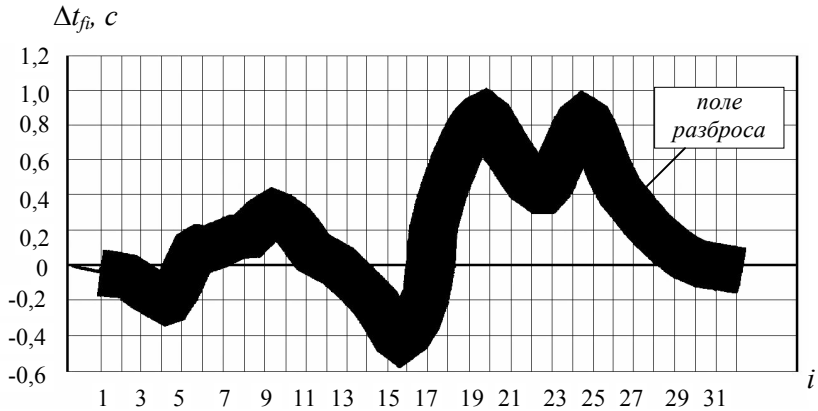


Рис. 3. Уровнемерные ошибки измерения объёмов горючего ББ, возникающие при отработке системой стабилизации РН «Союз-2» максимальных ветровых возмущений

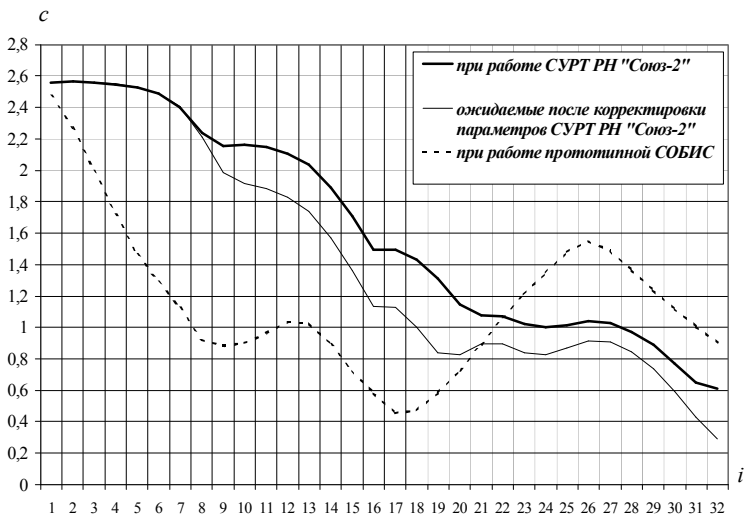


Рис. 4. Статистически предельные значения истинных рассогласований объёмов компонентов топлива в ББ



*РН «Союз-2» при максимальных ветровых возмущениях*

вышения истинными конечными рассогласованиями объемов компонентов топлива ББ допустимого по ТЗ значения. Впрочем, прототипная система (с аббревиатурой СОБИС) РН «Молния» и «Союз» в тех же условиях пуска и при таком же действии автомата угловой стабилизации «сработала» бы не лучше (см. график на рис. 4, выделенный пунктирной линией).

Разница же между СУРТ и СОБИС состоит в том, что «совершенствование» параметров СОБИС применительно к экстремальным условиям действия ветровых возмущений на изделие не может привести к сколько-нибудь заметному улучшению точностных характеристик внутриблочного регулирования опорожнения баков, а «совершенствование» параметров СУРТ – может: статистически предельное значение конечного рассогласования объёмов компонентов топлива ББ на РН «Союз-2» при скорректированном по результатам моделирования ПО не превышает 0,29 с (допуск 0,3 с по ТЗ), но отклонения (от номинала  $K_V^B$ ) соотношения объёмных расходов компонентов топлива ББ при этом могут превысить допустимое значение (7,0%) на  $\approx 1,0\%$ . В реальном же пуске РН «Союз-2» (со скорректированным ПО) при выведении изделия 14Ф137, состоявшемся 26.07.08 г., конечные рассогласования объёмов компонентов топлива ББ не превысили 0,06 с, а отклонения соотношения расходов компонентов топлива от номинала  $K_V^B$  не выходили за рамки допустимых значений.

*Этап 2.* Целесообразность совершенствования алгоритмов действия СУРТ боковых блоков РН «Союз-2» обуславливается неопределенностью знаний о величине и длительности действия «ветровых» составляющих уровнемерных рассогласований объёмов компонентов топлива как при запусках с отечественных космодромов, так и особенно для планируемых пусков с космодрома ГКЦ в Куру, и, следовательно, негарантированностью полного парирования этих составляющих за счет только выбора параметров СУРТ ББ.

Конечно, можно было бы производить на борту РН формирование оценок возмущений, действующих в полете (с «очище-

нием» их от ошибок измерения на основе калмановской фильтрации). Однако это привело бы к резкому возрастанию (примерно на два порядка) объёма вычислений, выполняемых на борту для нужд СУРТ ББ.

Поэтому с целью минимизации изменений в уже отработанных бортовых алгоритмах СУРТ РН «Союз-2» предлагается дополнительно к основному управляющему сигналу СУРТ  $K_{i\ell}$  ( $i = 1, 2, \dots, 32$  – номер чувствительного элемента уровнемера ББ;  $\ell = 2, 3, 4, 5$ ) для каждого  $\ell$ -го ББ вычислять корректирующую поправку  $\Delta\delta K_{i\ell}$  ( $i = 1, 2, \dots, 32$ ;  $\ell = 2, 3, 4, 5$ ). На рис. 1 и рис. 2 были представлены примеры ошибок уровнемерного измерения в ББ. Нетрудно заметить, что влияние боковой перегрузки приводит в баках горючего оппозитно расположенных ББ к появлению противоположных по знаку ошибок измерения. Данное обстоятельство позволяет по моментам срабатывания ч.э. в баках горючего оппозитных ББ формировать временное рассогласование  $\Delta t_{r,i\ell}$  ( $i = 1, 2, \dots, 32$ ;  $\ell = 2, 3, 4, 5$ ) этих срабатываний и соответственно корректирующую поправку  $\Delta\delta K_{i\ell}$ . Формирование же нового уставочного для отработки системой РСК значения коэффициента соотношения объёмных расходов компонентов топлива  $K_{i\ell}$  ( $i = 1, 2, \dots, 32$ ;  $\ell = 2, 3, 4, 5$ ) предполагается производить по следующему алгоритму:

$$(1) \quad K_{i\ell} := K_{i\ell} + K_V^B \Delta\delta K_{i\ell}, \quad i = 1, 2, \dots, 32,$$

$$(2) \quad \Delta\delta K_{i\ell} = \begin{cases} 0, & \text{при } \ell = 1 \text{ или } i = 1, \\ A_i^* (B_i^B \Delta t_{r,i\ell} - \Delta t_{r,(i-1)\ell}), & \text{при } \ell = 2, 3, \dots, 5 \text{ и } i > 1, \end{cases}$$

где  $\Delta t_{r,i2} = (t_{r,i4} - t_{r,i2})/2$ ,  $\Delta t_{r,i3} = (t_{r,i5} - t_{r,i3})/2$ ,

$$\Delta t_{r,i4} = (t_{r,i2} - t_{r,i4})/2, \quad \Delta t_{r,i5} = (t_{r,i3} - t_{r,i5})/2;$$

$A_i^*$  – коэффициент усиления корректирующего контура;  $B_i^B$  – коэффициент «прицеливания» основного алгоритма СУРТ ББ.

Основную трудность в реализации предложенного подхода к совершенствованию алгоритмов действия СУРТ ББ доставляет выбор программы изменения коэффициента  $A_i^*$ . Дело в том, что

координата  $\Delta t_{r.il}$  ( $l = 2, 3, 4, 5$ ) зависит не только от поперечных перегрузок, действующих на изделие в полете I ступени, но и от основных (традиционных) возмущений, действующих на СУРТ боковых блоков (ошибки настройки двигателей, расходомеров, заправки баков и др.). На рис. 5 и рис. 6 в виде графиков представлены результаты статистического моделирования работы СУРТ ББ при выбранных параметрах корректирующего контура. Из этих графиков, свидетельствующих о возможности резкого (полуторакратного) снижения отклонений (от номинала) соотношения расходов компонентов топлива (с 8,0% до 5,2%) при высокоточной (с погрешностью 0,27 с) синхронизации опорожнения баков, следует обнадеживающий вывод по перспективам поддержания надёжности предстоящей эксплуатации РН «Союз-2».

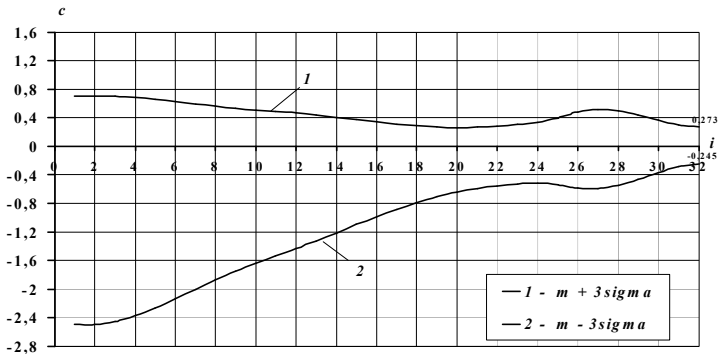


Рис. 5. Статистически предельные значения истинных рассогласований объёмов компонентов топлива в ББ РН «Союз-2» при действии ветровых возмущений и внутриблочном регулировании опорожнения баков с использованием корректирующей поправки (2)

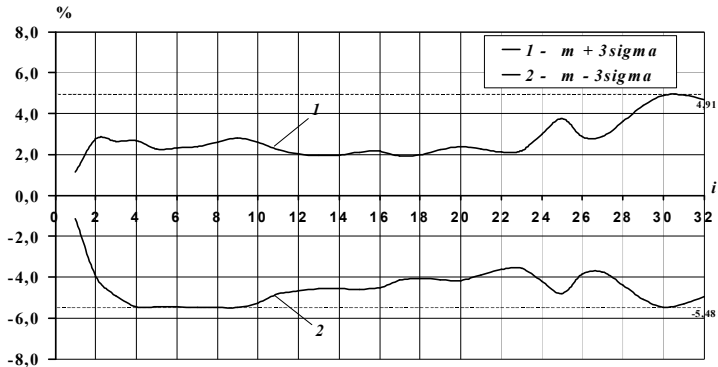


Рис. 6. Статистически предельные значения относительного отклонения (от номинала) объёмного соотношения расходов компонентов топлива в ББ РН «Союз-2» при действии ветровых возмущений и внутриблочном регулировании опорожнения баков с использованием корректирующей поправки (2)

## 5. Заключительное замечание

В статье изложены только конечные результаты поиска решения проблем управления, порождаемых возрастанием парусности РН. Возможности других решений тех же проблем, доставляемые средствами [1], оказались либо чрезмерно сложными в реализации, либо малоэффективными.

В качестве примера одного из отвергнутых решений второго типа можно привести вариант регулирования опорожнения баков с заменой (на интервале времени действия повышенных боковых перегрузок) уровнемерных данных об объёме горючего на текущие расходомерные их оценки: при вполне удовлетворительной терминальной точности регулирования опорожнения баков отклонения (от номинала) соотношения расходов компонентов топлива заметно вышли (см. рис. 7) за рамки допустимых значений.

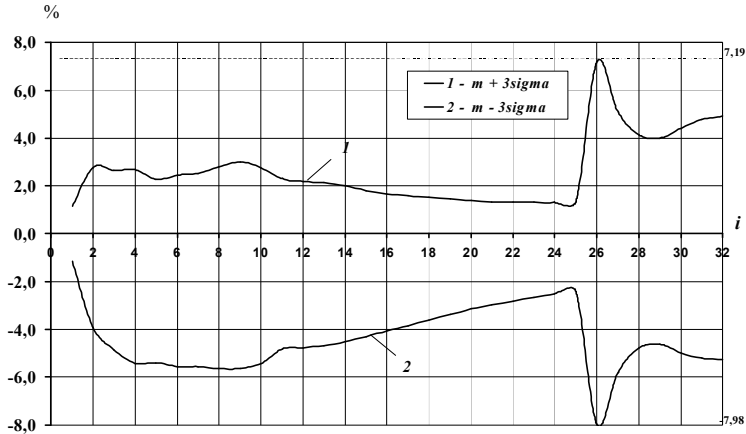


Рис. 7. Статистически предельные значения относительного отклонения (от номинала) объёмного соотношения расходов компонентов топлива в ББ РН «Союз-2» при действии ветровых возмущений и внутриблочном регулировании опорожнения баков с заменой (на интервале  $12 < i < 25$ ) уровневых данных об объёме горючего на текущие расходомерные их оценки

## Литература

1. АНДРИЕНКО А. Я., ИВАНОВ В. П. Совершенствование энергетических характеристик жидкостных ракет средствами автоматического управления. I, II // Проблемы управления. – 2009. – №№1, 2. – С. 66-71.
2. АНДРИЕНКО А. Я., ТРОПОВА Е. И., ЧАДАЕВ А. И. Опыт совершенствования методологии анализа работы бортовых систем управления ракет-носителей при их лётной эксплуатации // Сб. трудов международной конференции «Проблемы управления безопасностью сложных систем» МКПУ-IV. – 2009. – С. 1811-1821.
3. АФАНАСЬЕВ И. Подписан контракт на запуск первых «Союзов» из ГКЦ // Новости космонавтики. – 2007. – №8 (295). Том 17. – С. 50-51.
4. КОЗЛОВ Д. И. Основные направления модернизации косми-

*ческих средств выведения среднего класса типа ракеты-носителя «Союз» // Космонавтика и ракетостроение. – 1999. – №15. – С. 42-48.*

5. ПАВЕЛЬЦЕВ П. «Космос-2441», российский «Кейхоул»? // Новости космонавтики. – 2008. – №9 (308). Том 18. – С. 34-36.

## **CONTROL PROBLEMS AT LAUNCHING TO ORBIT OF LARGE-SIZED PAYLOAD**

**Anatolii Andrienko**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Laboratory Head, Doctor of Science, professor (Moscow, Prof-soyuznaya st., 65, (495) 334-88-71, vladguc@ipu.rssi.ru).

**Elena Tropova**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, researcher, (495) 334-88-71.

**Alexander Chadaev**, Institute of Control Sciences of RAS, Moscow, Cand. Sc., Senior scientific worker, (495) 334-88-71.

*Abstract: Several results are introduced of solving control problems that occurred during putting in service "Sojuz-2" launch vehicle with enlarged nose fairing.*

Keywords: propellant-consumption control system, large-sized nose fairing, wind disturbance, level gauges errors.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В Г. Заскановым*

УДК 004.4+51-37

ББК 73.22.1

## ЭКСПЕРТНОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПОСЛЕДСТВИЙ ПОВРЕЖДЕНИЯ СИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

**Андреев А. К.<sup>1</sup>, Камаев Д. А.<sup>2</sup>**

*(Государственное учреждение «Научно-производственное объединение «Тайфун», Федеральный информационно-аналитический Центр Росгидромета, г. Обнинск)*

**Трахтенгерц Э. А.<sup>3</sup>**

*(Учреждение Российской академии наук Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Москва)*

*В настоящей работе изложены принципы функционирования и архитектура системы, которая предназначена для прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации.*

Ключевые слова: Прогнозирование, системы жизнеобеспечения, цунами, система поддержки принятия решений.

### **1. Введение**

Современные города имеют сложную совокупность систем жизнеобеспечения, поддерживающую необходимые санитарно-

---

<sup>1</sup> Андреев Алексей Константинович, аспирант, (48439)4-49-50, aka@feerc.obninsk.org.

<sup>2</sup> Камаев Дмитрий Альфредович, доктор технических наук, (48439)4-49-50, kda@feerc.obninsk.org.

<sup>3</sup> Трахтенгерц Эдуард Анатольевич, доктор технических наук, профессор, (495)334-88-40, tracht@ipu.rssi.ru.

гигиенические условия, а также условия для труда, быта и отдыха населения. Система жизнеобеспечения города включает в себя системы: водоснабжения, канализации, газоснабжения, связи, электроснабжения, теплоснабжения, мусороудаления и другие системы для обслуживания жилых и промышленных районов. Для большинства из этих систем характерно наличие источника, для эксплуатации которого создаются специальные сооружения, и трассы инженерных коммуникаций (сетей), обеспечивающих доставку потребителям воды, газа, тепла и т.д. Большинство инженерных сетей города имеют свою структуру и подразделяются на питающие водопроводы, теплосети, линии электропередач и т.д., идущие от источника питания до мест присоединения к распределяющим сетям; распределяющие сети; разводящие сети, идущие от мест присоединения к распределяющим сетям до потребителей; отводящие сети, которые делятся на принимающие, собирающие и отводящие. Все названное многообразие систем жизнеобеспечения может функционировать при условии специально организованного взаимодействия друг с другом.

В условиях возникновения чрезвычайной ситуации, обусловленной явлениями природного и техногенного характера, системы жизнеобеспечения испытывают воздействия, которые могут вызвать их повреждения и нарушить нормальное функционирование, что, в свою очередь, может привести к тяжелым последствиям для населения. Прогнозирование последствий повреждения систем жизнеобеспечения является важной задачей при планировании мероприятий по защите населения в чрезвычайных ситуациях.

Системы жизнеобеспечения представляют собой сложные структуры, поэтому комплексное прогнозирование их поведения в условиях чрезвычайной ситуации на основе аналитических моделей, как правило, невозможно из-за отсутствия адекватных моделей, охватывающих все виды систем жизнеобеспечения и учитывающие их взаимодействие. Альтернативным подходом к проблеме прогнозирования поведения



систем жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации является подход, опирающийся на реализацию компьютерных систем, для которых экспертные знания и оценки, также как и фактические измерения, являются входными данными, способными согласовывать несопадающие мнения экспертов и на основании этих данных оценивать последствия чрезвычайных ситуаций.

В настоящей работе изложены принципы функционирования и архитектура системы, которая предназначена для прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием цунами.

## **2. Прогнозирование состояния системы жизнеобеспечения**

В рамках настоящей разработки система жизнеобеспечения населения рассматривается как совокупность взаимодействующих подсистем жизнеобеспечения (ПСЖ). Вследствие возникновения чрезвычайной ситуации каждая ПСЖ может подвергнуться неблагоприятным воздействиям, которые приведут к потере ряда функций. Неблагоприятные воздействия на ПСЖ могут иметь причиной как само стихийное бедствие, так и нарушение функционирования связанных с ней ПСЖ.

Система может использоваться для решения следующих задач:

- прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием волн цунами;
- моделирования возможных состояний системы жизнеобеспечения, которые могут возникнуть в результате реализации гипотетических сценариев воздействия волн цунами.

Первая задача решается с помощью системы в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием волн цунами. Результаты решения используются для оперативной организации мероприятий по обеспечению безопасности населения и

хозяйственной деятельности в прибрежных районах и уменьшению возможного ущерба от цунами.

Вторая задача возникает при составлении предварительных планов проведения работ по обеспечению безопасности населения и хозяйственной деятельности в прибрежных районах и уменьшению возможного ущерба от цунами. Использование системы позволяет осуществить анализ возможных последствий воздействия волн цунами на систему жизнеобеспечения населения. Такой анализ позволяет выделить типичные сценарии воздействия цунами и последствий и осуществлять на их основе разработку предварительных планов.

При прогнозировании состояния системы жизнеобеспечения в системе применяется подход, опирающийся на использование экспертной информации. Получение и ввод в компьютерную систему экспертной информации выполняется на подготовительном этапе при помощи специального модуля (его функционирование подробно описано в разделе 4). На подготовительном этапе осуществляется формирование на основе экспертной информации исходных данных для выполнения процедур прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения, которые включают: схемы инфраструктуры подсистем жизнеобеспечения; информацию, характеризующую влияние элементов инфраструктуры; схемы технологических процессов подсистем жизнеобеспечения; множество возможных факторов воздействия на элементы инфраструктуры; таблицы весов факторов воздействия для элементов инфраструктуры; технологические параметры операций и соответствующие режимы функционирования; технологические характеристики операций и их зависимость от состояния элементов.

Объем используемых экспертных данных значителен и не может вводиться одним экспертом, так как требует специальных знаний, всей совокупностью которых отдельный эксперт может не обладать. Кроме того, введение большого объема данных одним экспертом может сопровождаться ошибками. По этим

причинам в системе применяются процедуры группового экспертного оценивания и согласования экспертных оценок.

Результаты прогнозирования в значительной степени зависят от используемой экспертной информации. Для оценки влияния экспертных оценок на результаты прогнозирования в системе предусмотрена возможность варьирования вводимых экспертных данных. Оценка влияния экспертной информации на результаты прогнозирования осуществляется при настройке системы, а также при решении задач предварительного планирования.

Схема функционирования системы приведена на рис. 2.1.

При использовании системы в условиях возникшей чрезвычайной ситуации в систему вводятся данные о чрезвычайной ситуации – выполняется этап ЧС на рис. 2.1. В режиме аварийного планирования, когда осуществляется анализ возможных состояний системы жизнеобеспечения населения вследствие воздействия волн цунами, в систему вводятся гипотетические данные о чрезвычайной ситуации – выполняется этап А, см. рис. 2.1.

Будем рассматривать взаимодействие шести подсистем жизнеобеспечения  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ , соединенных между собой средствами коммуникаций (кабели, газопроводы и т.п., которые рассматриваются как отдельные ПСЖ или включаются составной частью в соответствующие ПСЖ) и образующих систему жизнеобеспечения населения в месте проживания, см. рис. 2.2.

В качестве примера ПСЖ рассмотрим подсистему водоснабжения, именуемую в дальнейшем «Водоканал», см. рис. 2.3.

При оценке последствий воздействия волны цунами у каждой ПСЖ рассматривается её инфраструктура и процесс функционирования (технологический процесс). Элементы инфраструктуры – это материальные фрагменты ПСЖ, например здания, оборудование, инженерные сооружения и т.п. При этом считается, что элемент инфраструктуры может испытывать воздействие волны цунами, которое приводит к нарушению его

функционирования. Кроме того, нарушение функционирования элемента инфраструктуры ПСЖ может иметь причиной нарушение функционирования другого элемента инфраструктуры.



Рис. 2.1. Схема функционирования системы

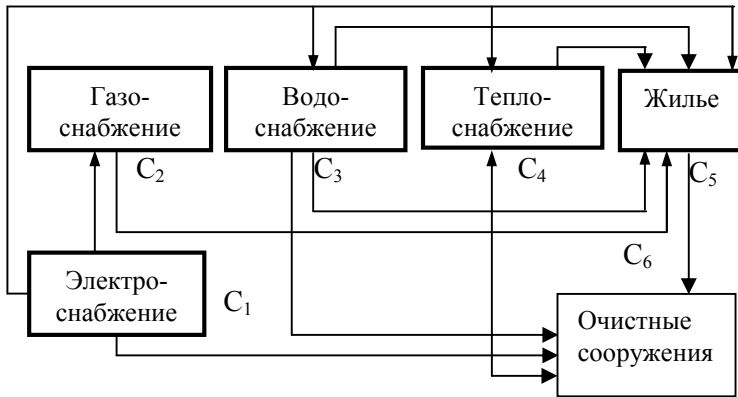


Рис. 2.2. Схема системы жизнеобеспечения

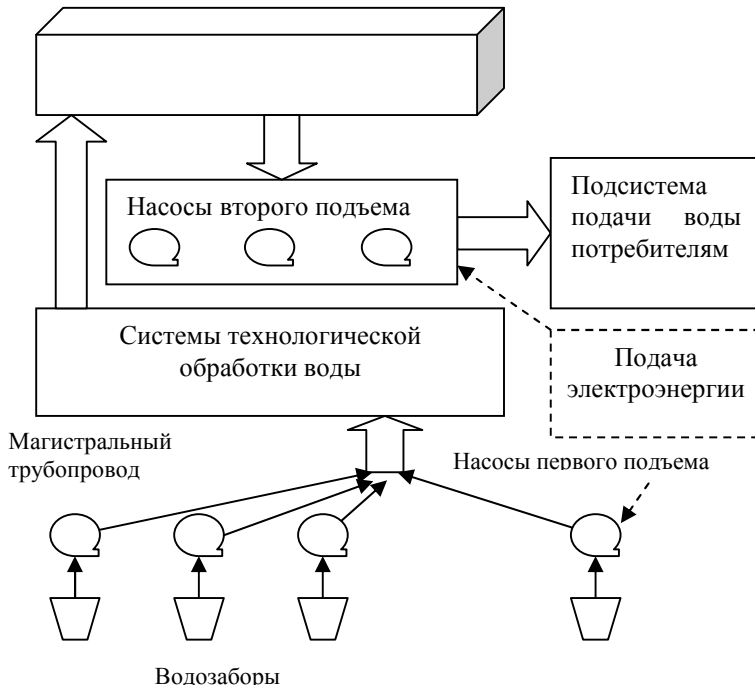


Рис. 2.3. Подсистема водоснабжения

В системе используется представление инфраструктуры в виде «схемы инфраструктуры», формируемой на основе экспертных знаний и представляющей собой ориентированный граф. Вершины в графе соответствуют некоторым блокам элементов инфраструктуры, а ребра – связям между блоками элементов. Наличие в графе ориентированного ребра, идущего из одной вершины в другую, означает, что повреждение в соответствующем первой вершине блоке элементов инфраструктуры вызывает повреждение в блоке элементов, соответствующем второй вершине. Действия экспертов в процессе формирования «схемы инфраструктуры» заключаются в объединении элементов инфраструктуры ПСЖ в блоки таким способом, чтобы полученная в результате схема инфраструктуры была отображением инфраструктуры в виде крупных блоков (процедура построения схемы инфраструктуры приведена в разделе 4.1), см. рис. 2.4.

В схеме инфраструктуры ПСЖ «Водоканал» имеются связи  $(a_1, a_4)$ ,  $(a_2, a_4)$ ,  $(a_3, a_4)$ ,  $(a_8, a_9)$  между вершинами. Это означает, что повреждение элемента инфраструктуры «Станция технологической обработки воды» может вызвать повреждение элемента «Резервуар чистой воды» вследствие конструктивных особенностей рассматриваемой ПСЖ: резервуар чистой воды расположен внутри станция технологической обработки. Аналогично, из-за конструктивных особенностей повреждения водозаборов вызывают повреждения насосной станции первого подъема. Остальные элементы инфраструктуры ПСЖ «Водоканал» независимы, т.е. повреждение каждого из них не вызывает повреждений других элементов.

Представление технологического процесса ПСЖ в системе осуществляется в виде «схемы технологического процесса ПСЖ», которая является ориентированным ациклическим графом. Вершины графа соответствуют технологическим этапам (операциям), а ребра – связям между этапами. Ориентация ребер задает последовательность выполнения этапов. Схема технологического процесса формируется экспертами и строится так,

чтобы полученная в результате схема была изображением технологического процесса ПСЖ в виде последовательности операций, см. рис. 2.5.

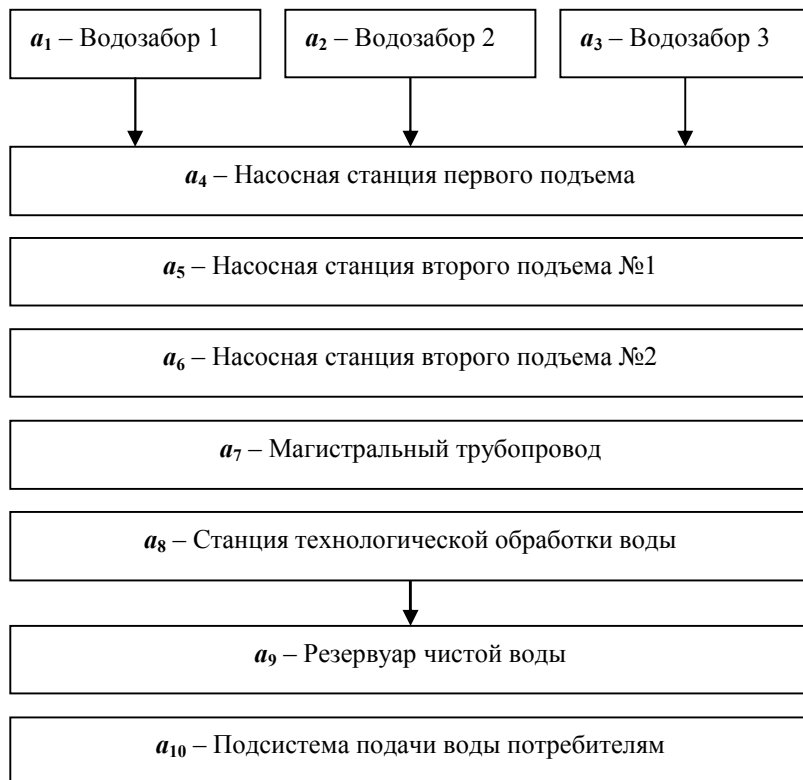


Рис. 2.4. Схема инфраструктуры ПСЖ «Водоканал»

Двойные стрелки обозначают подачу электроэнергии, требующейся для выполнения технологических операций, а также подачу воды потребителям (операция  $A_7$ ).

При оценке последствий воздействия цунами считается, что волны цунами могут вызывать повреждения элементов инфраструктуры ПСЖ, что, в свою очередь, приводит к нарушениям в осуществлении технологического процесса и, тем самым, сни-

жению качества функционирования ПСЖ в целом. Для оценки воздействия цунами на элементы инфраструктуры в системе введено множество факторов воздействия. С помощью наборов факторов воздействия задается сценарии чрезвычайной ситуации, обусловленной воздействием цунами. Множество факторов воздействия формируется на основе экспертных знаний.

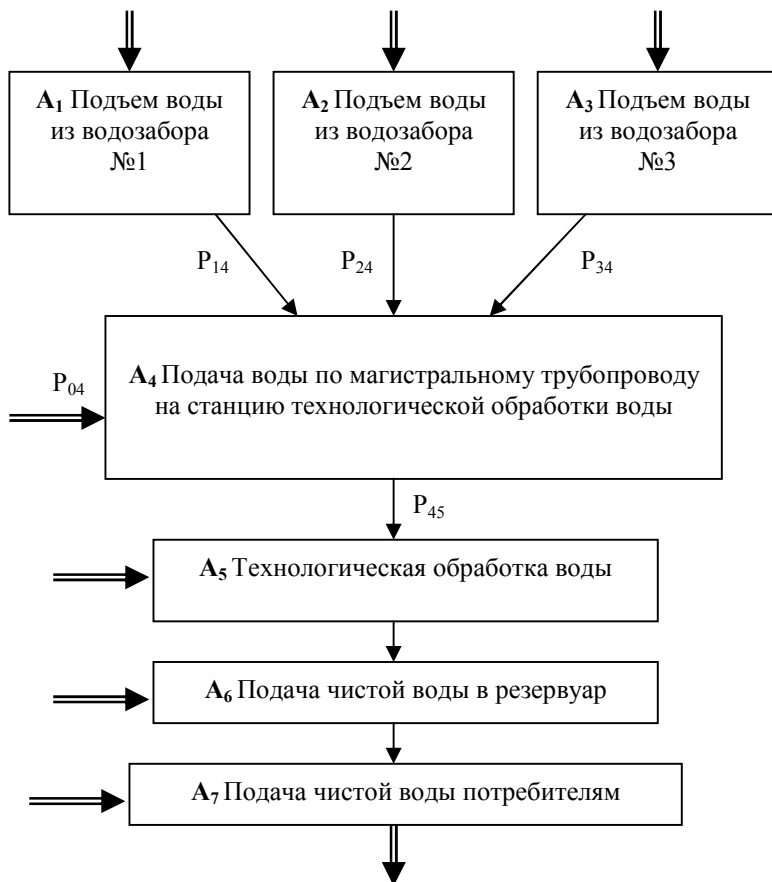


Рис. 2.5. Схема технологического ПСЖ «Водоканал»



В дальнейшем всюду термин «элемент схемы инфраструктуры» означает блок элементов инфраструктуры ПСЖ, а термин «операция технологического процесса» означает операцию в схеме технологического процесса.

### **3. Описание этапов процедуры прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения**

В предшествующем разделе в общих чертах приведена схема процедуры прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения (рис. 2.5). В настоящем разделе приводится подробное описание используемых схем, понятий и величин. Необходимая для функционирования системы экспертная, техническая и технологическая информация вводится в систему при помощи процедур, изложенных в разделе 4.

#### **3.1. ФОРМИРОВАНИЕ И ОЦЕНКА НАБОРА ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ НА ИНФРАСТРУКТУРУ ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Множество факторов воздействия  $\{\Phi_1, \dots, \Phi_s\}$  представлено в системе в виде списка, который формируется на основе экспертных знаний. Каждый фактор воздействия описывается текстовым предложением и может содержать количественные показатели.

##### ***Пример множества факторов воздействия.***

Территория населенного пункта разделяется на зоны  $\{W_1, \dots, W_h\}$ . Для каждой зоны введены оценки следующих параметров волн цунами:

$h_{\max}$  – максимальная глубина затопления от волны цунами, м;

$V_{\max}$  – максимальная скорость течения воды в волне, м/с;

$t$  – температура воды в волне, град.;

$T$  – время существования волны (продолжительность затопления), ч.

Для каждого из перечисленных параметров введена дискретная шкала значений. Произвольный фактор воздействия представлен в системе в виде набора  $(W_i, h_{\max}, V_{\max}, t, T)$  и предъявляется эксперту (пользователю) в виде текстового предложения:

*«В зоне  $W_i$  наблюдаются следующие значения параметров волн цунами: максимальная глубина затопления от волны цунами –  $h_{\max}$ , м; максимальная скорость течения воды в волне –  $V_{\max}$ , м/с; температура воды в волне –  $t$ , град.; время существования волны (продолжительность затопления) –  $T$ , ч.»*

Для описания повреждения элементов  $a$  инфраструктуры ПСЖ вводится величина  $d(a)$  – «степень повреждения элемента  $a$ », которая оценивается в лингвистической шкале, см. таблицу 3.1.

*Таблица 3.1. Шкала оценки степени повреждения элементов инфраструктуры ПСЖ*

Лингвистическая шкала	Числовая оценка	Комментарий
«повреждение отсутствует»	0	Элемент инфраструктуры не подвергся воздействию или воздействие незначительно.
«среднее повреждение»	1	Воздействие на элемент инфраструктуры вызвало значительные повреждения оборудования.
«полное разрушение»	2	Воздействие на элемент инфраструктуры привело к полному разрушению.

Точный смысл выражений «повреждение отсутствует», «среднее повреждение», «полное разрушение» устанавливается экспертами для каждого элемента инфраструктуры индивидуально. Например, для элемента инфраструктуры «Станция

технологической обработки воды» (рис. 2.3) смысл элементов шкалы оценок степени повреждения приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Шкала оценки степени повреждения элемента «Станция технологической обработки воды»

Лингвистическая шкала	Комментарий
«повреждение отсутствует»	Оказанное воздействие незначительно или совсем отсутствует, так что технологическое оборудование не пострадало.
«среднее повреждение»	Воздействие волны цунами вызвало повреждения: а) части установок фильтрации воды; б) части насосов подачи воды; в) ..... (В пунктах а), б), в) ... приводится описание ситуаций, которые могут сложиться в результате воздействия)
«полное разрушение»	Воздействие на элемент инфраструктуры привело к полному разрушению здания станции и оборудования.

Для каждого фактора воздействия  $\Phi_{\xi}$  и элемента  $a$  инфраструктуры ПСЖ в системе зафиксированы значения двух величин:  $d(a, \Phi_{\xi})$ ,  $\varphi_{\xi}(a)$  – степени повреждения элемента инфраструктуры ПСЖ (по шкале в таблице 3.1) и веса воздействия фактора  $\Phi_{\xi}$  на элемент инфраструктуры соответственно. При этом для любого  $a$  должно выполняться условие (1):

$$(1) \sum_{\xi} \varphi_{\xi}(a) = 1.$$

Для приведенного выше примера множества факторов воздействия вес  $\varphi_{\xi}(a)$  фактора  $\Phi_{\xi} = (W_i, h_{\max}, V_{\max}, t, T)$  равен 1, если элемент инфраструктуры  $a \in W_i$ , и 0 в противном случае.

Значения степеней повреждения элементов инфраструктуры ПСЖ и весов воздействия факторов устанавливаются на

основе технических характеристик элементов инфраструктуры или на основе знаний экспертов. Например, для зданий, являющихся элементами инфраструктуры, используются эмпирические знания о критических значениях параметров волн цунами, вызывающих повреждения различной тяжести, см. таблицу 3.3. Таким образом, для элемента инфраструктуры  $a$  = «трансформаторная подстанция» и фактора  $\Phi_{\xi}$  со значениями  $h_{max} = 6$  м,  $V_{max} = 3$  м/с,  $d(a, \Phi_{\xi}) = 2$

Таблица 3.3. Параметры волн цунами, вызывающих повреждения зданий различных типов

№ п/п	Тип здания	Полное разрушение		Среднее повреждение	
		$h_{max}$ , м	$V_{max}$ м/с	$h_{max}$ , м	$V_{max}$ м/с
1.	Лёгкие 1-2 этажные бескаркасные постройки	3,5	2	3	1,5
2.	Промышленные здания с лёгким металлическим каркасом и здания бескаркасной постройки	5	2,5	3,5	2
3.	Промышленные здания с тяжёлым металлическим или железобетонным каркасом (стены из керамзитобетонных панелей)	7,5	4	6	3
4	Бетонные и железобетонные здания, здания антисейсмической конструкции	12	4	9	3
5	Трансформаторные подстанции	5	2	4	2
...	...	...	...	...	...

Процедура оценки набора значимых факторов воздействия чрезвычайной ситуации на инфраструктуры отдельных подсистем жизнеобеспечения выполняется следующим образом (подробно процедура приведена в разделе 4.3). По информации о процессе наката волны цунами на береговую зону, которая получена на основе моделирования или непосредственного наблюдения и представлена экспертам, компьютерная система определяет  $\Xi$  – множество элементов инфраструктуры ПСЖ, которые могут подвергнуться прямому воздействию волн цунами. Фактор  $\Phi_\xi$  включается в множество значимых (в складывающейся ситуации) факторов, если существует элемент  $a \in \Xi$ , для которого  $d(a, \Phi_\xi) \geq 1$

### 3.2. ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ ИНФРАСТРУКТУРЫ ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНОЙ СИТУАЦИИ

Как уже было ранее отмечено, в системе схема элементов инфраструктуры ПСЖ представляет собой ориентированный граф  $F(\{a_i\}, \{f_{ij}\})$ , в котором вершины  $a_i$  соответствуют элементам инфраструктуры, а ребра  $f_{ij}$  – связям между элементами  $a_i, a_j$ . Наличие в графе ориентированного ребра  $f_{ij}$ , идущего из вершины  $a_i$  в вершину  $a_j$ , означает, что повреждение элемента  $a_i$  вызывает повреждение элемента  $a_j$ , см. рис. 2.4.

Для каждой пары элементов инфраструктуры  $a_i, a_j$ , соединенных ребрами, вводятся функции влияния  $h_{ij}(d(a_i))$  и  $h_{ji}(d(a_j))$ , имеющие следующий смысл. Если в графе инфраструктуры имеется ориентированное ребро  $a_i \rightarrow a_j$ , идущее из элемента  $a_i$  в элемент  $a_j$ , и элемент  $a_i$  имеет степень повреждения  $d(a_i)$ , тогда элемент  $a_j$  должен иметь степень повреждения равную  $h_{ij}(d(a_i))$ . Аналогичный смысл имеет функция  $h_{ji}(d(a_j))$ . Очевидно, что  $h_{ji}(0) = 0$ . Например, в графе инфраструктуры ПСЖ «Водоканал», приведенном на рис. 2.4, элемент  $a_8 = \text{«Станция технологической обработки воды»}$  соединен с элементом  $a_9 = \text{«Резервуар чистой воды»}$  ребром  $a_1 \rightarrow a_2$ .

$$(2) \quad h_{89}(d) = \begin{cases} 0, & \text{если } d = 0, \\ 0, & \text{если } d = 1, \\ 2, & \text{если } d = 2. \end{cases}$$

Функция влияния (2) имеет следующий смысл: частичное повреждение «Станции технологической обработки воды» не вызывает повреждений «Резервуара чистой воды», и только полное разрушение здания станции вызывает разрушение резервуара, см. таблицу 3.2.

Степень повреждения для всей совокупности элементов инфраструктуры  $\{a_j\}$  определяется как распределение величин  $\{d(a_j), j = 1, 2, \dots\}$  и вычисляется следующим образом.

*Шаг №1.* Определяется  $M(F)$  – множество вершин графа  $F(\{a_i\}, \{f_{ij}\})$ , которые соответствуют элементам инфраструктуры, подвергшихся прямому воздействию волны цунами.

*Шаг №2.* Для каждой вершины  $a$  из множества  $M(F)$  на основе моделирования наката волны на береговую линию производится оценка значений параметров волны цунами и с их помощью с использованием таблиц вида 3.3. оцениваются  $\tilde{d}(a)$ ,  $a \in M(F)$  – степени повреждения элементов инфраструктуры, обусловленные воздействием волны цунами. Оценка производится по формуле (3):

$$(3) \quad \tilde{d}(a) = \sum_{\Phi_\xi} \hat{\varphi}_\xi(a) \cdot d(a, \Phi_\xi),$$

$$(4) \quad \hat{\varphi}_\xi(a) = \varphi_\xi(a) \cdot \left( \sum_{\Phi_\rho} \varphi_\rho(a) \right)^{-1},$$

где (4) – приведенный вес фактора  $\Phi_\xi$ ; суммирование в обеих формулах производится по всему множеству значимых факторов.

*Шаг №3.* Определяется подграф  $L(M(F))$  графа  $F(\{a_i\}, \{f_{ij}\})$ , являющийся компонентой связности подмножества вершин  $M(F)$ .

*Шаг №4.* Для каждой вершины  $a \in FL(M(F))$  устанавливается значение степени повреждения  $d(a) = 0$ .

*Шаг №5.* Вычисляется множество  $\mathfrak{R}$  – возможных распределений степени повреждения  $\{d(a)\}$ ,  $a \in L(M(F))$ , удовлетворяющих условиям:

- (5) 1. Если ребро  $f_{ij} \in L(M(F))$ , то  $d(a_j) \geq h_{ij}(d(a_i))$ ;  
 2. Если вершина  $a \in M(F)$ , то  $d(a) \geq \tilde{d}(a)$ .

Затем из множества  $\mathfrak{R}$  в качестве *распределения степеней повреждения элементов инфраструктуры* выбирается распределение  $\{d_0(a)\}$ ,  $a \in L(M(F))$ , удовлетворяющее условию минимума:

$$(6) \quad \sum_{a \in L(M(F))} d_0(a) = \min \left\{ \sum_{a \in L(M(F))} d(a) \mid \text{минимум по множеству } \mathfrak{R} \right\}.$$

Если распределений, удовлетворяющих условию минимума, несколько, то все они предъявляются экспертам для выбора на основе процедуры согласования.

**Пример оценки состояния инфраструктуры ПСЖ «Водоканал», см. рис. 2.4.**

Пусть система в качестве множества значимых факторов обнаружила единственный фактор:  $\Phi = \langle \text{В зоне } W_1 \text{ наблюдаются следующие значения параметров волн цунами: максимальная глубина затопления от волны цунами} - h_{\max} = 6 \text{ м; максимальная скорость течения воды в волне} - V_{\max} = 3 \text{ м/с; температура воды в волне} - t = 10 \text{ град.; время существования волны (продолжительность затопления)} - T = 0,3 \text{ ч} \rangle$ .

*Шаг №1.* Оказалось, что в зону  $W_1$  попадают два элемента инфраструктуры:  $a_8 = \langle \text{Станция технологической обработки воды} \rangle$  и  $a_9 = \langle \text{Резервуар чистой воды} \rangle$ . Прямому воздействию волн цунами подвергся элемент  $a_8$ , так как резервуар чистой воды находится внутри здания станции технологической обработки воды. Таким образом,  $M(F) = a_8$ .

*Шаг №2.* Так как здание станции технологической обработки воды по своему типу относится к промышленным зданиям с лёгким металлическим каркасом, то в соответствии с таблицей 3.3  $\tilde{d}(a_8) = d(a_8, \Phi) = 2$ .

*Шаг №3.* Подграф  $L(M(F))$ , являющийся компонентой связности подмножества вершин  $M(F) = a_8$ , содержит вершины  $a_8, a_9$ .

*Шаг №4.* Для всех элементов, кроме  $a_8, a_9$ , устанавливается значение степени повреждения  $d(a) = 0$ .

*Шаг №5.* Множество возможных распределений степени повреждения  $\mathfrak{R}$  оказывается состоящим из единственного распределения, см. таблицу 3.4, которое и выбирается экспертами в качестве *распределения степеней повреждения элементов инфраструктуры «Водоканал»*.

*Таблица 3.4. Распределение степеней повреждения элементов инфраструктуры «Водоканал»*

Элемент инфраструктуры	Оценка степени повреждения
Станция технологической обработки воды	2
Резервуар чистой воды	2
Остальные элементы инфраструктуры	0

### **3.3. ОЦЕНКА НАРУШЕНИЙ В ОСУЩЕСТВЛЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ОТДЕЛЬНЫХ ПОДСИСТЕМ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ**

Схема технологического процесса ПСЖ представлена в системе ориентированным ациклическим графом  $G(\{A_i\} \cup \{B_k\}, \{P_{ij}\})$ , в котором вершины  $A_i$  соответствуют технологическим этапам (технологическим операциям), а ребра  $P_{ij}$  – связям между элементами  $A_i, A_j$ . Наличие в графе ориентированного ребра  $P_{ij}$ , идущего из вершины  $A_i$  в вершину  $A_j$  означает, что сначала выполняется технологический этап  $A_i$ , а затем этап  $A_j$ . Вершины  $B_k$  соответствуют завершающим операциям внешних систем (по отношению к рассматриваемой ПСЖ). Ребро, идущее из  $B_k$  в  $A_i$  и называемое входным для рассматриваемой ПСЖ, символизирует, что на вход операции  $A_i$  поступает материал, являющийся результатом выполнения операции  $B_k$ . В



свою очередь, ребро, идущее из  $A_i$  в  $B_k$  и называемое выходным для рассматриваемой ПСЖ, символизирует, что на вход операции  $B_k$  поступает материал, являющийся результатом выполнения операции  $A_i$ , см. рис. 3.1.

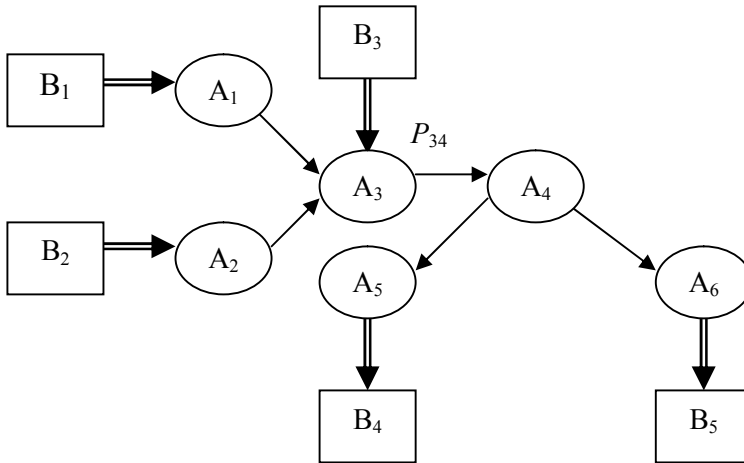


Рис. 3.1. Пример графа

Каждому ориентированному ребру  $P_{ij}$ , идущему из вершины  $A_i$  в вершину  $A_j$ , сопоставлен *вектор значений технологических параметров*  $X_{ij} = (x_{ij}^1, \dots, x_{ij}^{n(i)})$ . По отношению к операции  $A_i$  вектор  $X_{ij}$  описывает характеристики результата её выполнения. По отношению к операции  $A_j$  вектор  $X_{ij}$  описывает характеристики поступающего материала в результате выполнения операции  $A_i$ . Соответствие (7), где объединение выполняется по всем операциям, результаты выполнения которых попадают на вход операции  $A_j$ , моделирует преобразование материала в результате выполнения операции  $A_j$ :

$$(7) \bigcup_{\alpha} X_{\alpha j} \rightarrow X_{jk}.$$

Для каждого ориентированного ребра  $P_{ij}$ , идущего из вершины  $A_i$  в вершину  $A_j$ , фиксируются  $\mathfrak{Z}_{ij}^0, \mathfrak{Z}_{ij}^1, \mathfrak{Z}_{ij}^2$ , – множества значений вектора параметров  $X_{ij}$ . При этом множество  $\mathfrak{Z}_{ij}^0$  соот-

ответствует значениям параметров  $X_{ij}$ , предусмотренных технологическим регламентом (*нормальный режим функционирования*), множество  $\mathfrak{T}_{ij}^1$  соответствует существенным отклонениям значений параметров  $X_{ij}$  от технологического регламента (*аварийный режим функционирования*). Если параметры  $X_{ij}$  принимают значения из множества  $\mathfrak{T}_{ij}^2$ , то это означает, что поступающий в результате выполнения операции  $A_i$  материал (вода, электрический ток, газ и т.д.) не может подаваться на вход операции  $A_j$  (*разрыв связи между технологическими операциями  $A_i$  и  $A_j$* ). Аналогичные множества  $I_{ij}^0, I_{ij}^1, I_{ij}^2$  и  $U_{ij}^0, U_{ij}^1, U_{ij}^2$  вводятся, соответственно, для входных и выходных ребер рассматриваемой ПСЖ.

***Пример технологических параметров операции.***

В схеме технологического процесса для ПСЖ «Водоканал» (см. рис. 2.5.) представлена операция  $A_4$  – «Подача воды по магистральному трубопроводу на станцию технологической обработки воды». У этой операции имеется три входные стрелки (связи) –  $P_{14}, P_{24}, P_{34}$ , идущие из вершин «Подъем воды от водозаборов №№1, 2, 3», одна стрелка  $P_{04}$  ведущая от ПСЖ «Подача электроэнергии», а также одна выходная стрелка  $P_{45}$ , ведущая из вершины  $A_4$  в вершину  $A_5$ , соответствующую операции «Технологическая обработка воды». С каждой из перечисленных стрелок связаны векторы значений технологических параметров, см. таблица 3.5.

Следствием воздействия цунами на элементы инфраструктуры ПСЖ может быть снижение качества выполнения технологических операций. Для оценки величины  $Q(A_j)$ , качества выполнения технологической операции  $A_j$ , вводится лингвистическая шкала, см. таблицу 3.6.

Таблица 3.5. Технологические параметры операции: «Подача воды по магистральному трубопроводу на станцию технологической обработки воды»

Технологический параметр	Значения технологического параметра		
	Нормальный режим функционирования	Аварийный режим функционирования	Разрыв связи
Объем забираемой воды из водозабора №№1,2,3 $V_{14}, V_{24}, V_{34}$ (м <sup>3</sup> /час)	$\mathfrak{V}_{14}^0 = \{V_{14} \geq 50\}$ $\mathfrak{V}_{24}^0 = \{V_{24} \geq 50\}$ $\mathfrak{V}_{34}^0 = \{V_{34} \leq 80\}$	$\mathfrak{V}_{14}^1 = \{30 \leq V_{14} < 50\}$ $\mathfrak{V}_{24}^1 = \{30 \leq V_{24} < 50\}$ $\mathfrak{V}_{34}^1 = \{50 \leq V_{34} < 80\}$	$\mathfrak{V}_{14}^2 = \{V_{14} \leq 30\}$ $\mathfrak{V}_{24}^2 = \{V_{24} \leq 30\}$ $\mathfrak{V}_{34}^2 = \{V_{34} \leq 50\}$
Подаваемая электрическая мощность $W_{04}$ (квт/час)	$I_{04}^0 = \{W_{04} \leq 800\}$	$I_{04}^1 = \{800 \leq W_{04} < 600\}$	$I_{04}^2 = \{W_{04} < 600\}$
Объем воды, подаваемой на станцию обработки $V_{45}$ (м <sup>3</sup> /час)	$U_{45}^0 = \{V_{45} \geq 100\}$	$U_{45}^1 = \{70 \leq V_{45} < 100\}$	$U_{45}^2 = \{V_{45} < 70\}$

Таблица 3.6. Шкала оценки качества выполнения технологических операций

Лингвистическая шкала	Числовая оценка	Комментарий
«норма»	0	Операция выполняется в соответствии с технологическим регламентом
«отклонение»	1	Операция выполняется, но наблюдаются существенные отклонения от технологического регламента
«остановка»	2	Операция не выполняется

Пусть вершина  $A_j$  имеет входные стрелки  $P_{\lambda(1)j}, \dots, P_{\lambda(k)j}$  и выходные стрелки  $P_{j\mu(1)}, \dots, P_{j\mu(l)}$  (см. рис. 3.2.)

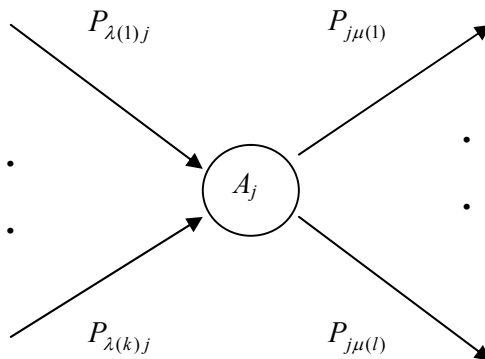


Рис. 3.2. Вершина графа

Для каждого значения качества выполнения операции  $Q(A_j) \neq 2$  вводится отображение (8), которое называется *технологической характеристикой операции  $A_j$*  и определяет параметры выходного материала в зависимости от параметров входного материала.

$$(8) \quad \Omega_{Q(A_j)} : \left( \mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left( \mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right),$$

$$\alpha(p) = 0, 1, \quad \beta(q) = 0, 1, \quad p = 1, \dots, k, \quad q = 1, \dots, l.$$

Очевидно,

$$\Omega_2 : \left( \mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left( \mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^2, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^2 \right), \quad \forall \alpha(p), p = 1, \dots, k.$$

**Пример технологической характеристики операции.**

Для операции  $A_4$  («Подача воды по магистральному трубопроводу на станцию технологической обработки воды») ПСЖ «Водоканал» технологическая характеристика имеет следующий вид:

$$Q(A_4) = 0: \quad \left( \mathfrak{Z}_{14}^0, \mathfrak{Z}_{24}^0, \mathfrak{Z}_{34}^0, I_{04}^0 \right) \mapsto U_{45}^0,$$

$$\left( \mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^1, \text{ если } \alpha(k) \geq 1$$

и  $\alpha(k_0) = 1$  для некоторого  $k_0 = 1, 2, 3, 4$ ,

$$\left( \mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^0,$$

если  $\alpha(k_0) = 0$  для некоторого  $k_0 = 1, 2, 3, 4$ ,

$$(9) \quad Q(A_4) = 1: \quad \left( \mathfrak{Z}_{14}^0, \mathfrak{Z}_{24}^0, \mathfrak{Z}_{34}^0, I_{04}^0 \right) \mapsto U_{45}^1,$$

$$\left( \mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^0,$$

если  $\alpha(k_0) = 1$  для некоторого  $k_0 = 1, 2, 3, 4$ ,

$$Q(A_4) = 2: \quad \left( \mathfrak{Z}_{14}^{\alpha(1)}, \mathfrak{Z}_{24}^{\alpha(2)}, \mathfrak{Z}_{34}^{\alpha(3)}, I_{04}^{\alpha(4)} \right) \mapsto U_{45}^0,$$

при любых  $\alpha(1), \alpha(2), \alpha(3), \alpha(4)$ .

С целью моделирования воздействия волн цунами на качество функционирования рассматриваемой ПСЖ, которое выражается в величинах характеристик материала завершающих операций, для каждого элемента инфраструктуры  $a_i$  вводится матрица воздействий  $((Q_i)_\delta)$ . Элемент  $(Q_i)_\delta^j$ , стоящий на пересечении столбца с номером  $j$  и строки с номером  $\delta$ , равен качеству выполнения операции  $A_j$  при условии, что степень повреждения элемента инфраструктуры равна  $\delta - 1$ :

$$(10) \begin{matrix} (\delta = 1, d(a_i) = 0) \\ (\delta = 2, d(a_i) = 1) \\ (\delta = 3, d(a_i) = 2) \end{matrix} \begin{bmatrix} 0 & \dots & 0 & \dots \\ (Q_i)_2^1 & \dots & (Q_i)_2^2 & \dots \\ (Q_i)_3^1 & \dots & (Q_i)_3^2 & \dots \end{bmatrix}.$$

Таким образом, матрица воздействий имеет три строки, а число столбцов совпадает с числом технологических операций рассматриваемой ПСЖ. Элементы таблицы – числа 0, 1, 2.

**Пример матрицы воздействий.**

Для элемента инфраструктуры ПСЖ «Водоканал»  $a_4$  – «насосная станция первого подъема» матрица воздействий имеет вид:

	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$A_4$	$A_5$	$A_6$	$A_7$
$d(a_4) = 0$	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
$d(a_4) = 1$	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
$d(a_4) = 2$	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>

Таким образом, повреждение элемента «Насосная станция первого подъема» влияет на качество выполнения операций «Подъем воды от водозаборов №№1, 2, 3». Причем в силу конструктивных особенностей повреждение насосной станции средней степени вызывает полное прекращение подъема воды из водозабора №3.

Схема технологического процесса, технологические параметры операций и соответствующие режимы функционирования, технологические характеристики операций, матрицы воздействий элементов инфраструктуры вводятся в систему на этапе её настройки при помощи процедур, которые подробно изложены в последующих разделах. Таким образом, оценка нарушений в осуществлении технологических процессов отдельных подсистем жизнеобеспечения сводится к определению качества выполнения для каждой технологической операции.

Если на предшествующем этапе (этап №2, см. рис. 2.5.) определено распределение степени повреждения  $\{d(a)\}$ ,  $a \in F$  элементов инфраструктуры, то на основе семейства матриц воздействий система определяет для каждой технологической операции  $A_j$  качество выполнения  $Q(A_j)$ . При этом если на тех-

нологическую операцию оказывает влияние несколько элементов инфраструктуры, то качество выполнения принимается равным

$$(11) Q(A_j) = \max \left\{ (Q_i)_{d(a)}^j \mid a \in F(\{a_i\}, \{f_{ij}\}) \right\}.$$

### 3.4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ВСЕЙ СИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ

На основе распределения качества выполнения технологических операций  $\{Q(A)\}$ ,  $A \in G(\{A_i\} \cup \{B_k\}, \{P_{ij}\})$  система вычисляет семейство отображений (12), которое позволяет по значениям параметров входного материала определить значения параметров выходного материала для каждой подсистемы жизнеобеспечения  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ .

$$(12) \quad \Omega_{Q(A)} : \left( \mathfrak{F}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{F}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left( \mathfrak{F}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{F}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right),$$

$$A \in G(\{A_i\} \cup \{B_k\}, \{P_{ij}\}),$$

$$\alpha(p) \in \{0, 1\}, \beta(q) \in \{0, 1\}, \quad p = 1, \dots, k, \quad q = 1, \dots, l.$$

Далее система на основе значений параметров входного материала определяет значения параметров выходного материала для всей системы жизнеобеспечения населения (см. рис. 2.1.) при помощи полученных на предыдущем этапе оценок качества функционирования подсистем  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$ .

Результаты оценки значений параметров выходного материала для всей системы жизнеобеспечения предъявляются для анализа экспертам, на основе которого они делают заключение о состоянии системы жизнеобеспечения и принятии необходимых мер по снижению возможных последствий.

## 4. Процедуры определения исходных данных для прогнозирования

Для функционирования системы необходима экспертная, техническая и технологическая информация, которая для каждой ПСЖ включает в себя:

- 1) схему инфраструктуры подсистемы жизнеобеспечения;
- 2) множество возможных факторов воздействия на блоки элементов инфраструктуры;
- 3) множество значимых факторов воздействия на блоки элементов инфраструктуры;
- 4) функции влияния блоков элементов инфраструктуры;
- 5) схему технологического процесса подсистемы жизнеобеспечения;
- 6) таблицы степеней повреждения элементов инфраструктуры для каждого фактора воздействия;
- 7) таблицы весов факторов воздействия для блоков элементов инфраструктуры;
- 8) технологические параметры операций и соответствующие режимы функционирования;
- 9) технологические характеристики операций;
- 10) матрицы воздействий блоков элементов инфраструктуры на технологические операции.

При формировании необходимой экспертной информации применяются методы согласования экспертных оценок.

Пусть в определении исходных данных для прогнозирования принимают участие эксперты  $\mathcal{E}(1), \dots, \mathcal{E}(N)$ . Выполнение части процедур работы группы экспертов координирует руководитель группы, который выбирается экспертами на неформальной основе либо при помощи изложенной ниже процедуры.

Система предлагает экспертам осуществить парные сравнения предпочтительности своих коллег как возможных руководителей и проставить оценки в виде индексов  $\delta_{jkd}$ , характеризующих степень предпочтительности  $j$ -го члена группы относительно  $k$ -го с субъективной точки зрения  $d$ -го члена группы,  $j, k = 1, \dots, N$ . При этом предполагается, что член группы  $d$  не сравнивает себя с другими членами группы, т.е.  $j \neq d$ ,  $k \neq d$ . Индекс  $\delta_{jkd}$  выставляется в соответствии с таблицей 4.1. При этом выполняется правило:  $\delta_{kjd} = -\delta_{jkd}$ .

Отношение  $r_{ikd} = \exp(\gamma\delta_{ikd})$  считается численной оценкой отношения предпочтительности  $j$ -го эксперта к предпочтитель-



ности  $k$ -го эксперта. Значение  $\gamma$  порождает логарифмическую шкалу, является параметром системы и устанавливается при наладке системы.

Таблица 4.1. Шкала сравнений степени предпочтительности экспертов

Лингвистическая шкала	Значение индекса $\delta_{ikd}$
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ значительно превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+8
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ существенно превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+6
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+4
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ слегка превосходит по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	+2
Эксперт $\mathcal{E}(j)$ эквивалентен по предпочтительности $\mathcal{E}(k)$	0

Затем строится вектор  $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$  предпочтительности каждого члена группы с помощью логарифмической регрессии (13), минимизирующей разницу между отношениями  $P_j/P_k$  и  $\delta_{jkd}$ , где  $D_{jk}$  – множество экспертов, высказавших свою оценку остальным. В результате получаются оценки степени предпочтительности (14):

$$(13) \sum_{j < k} \sum_{d \in D_{jk}} (\ln r_{jkd} - \ln P_j + \ln P_k)^2,$$

$$(14) \ln P_i = \frac{1}{N(N-2)} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq d}}^N \sum_{\substack{d=1 \\ d \neq j}}^N \ln r_{ikd}.$$

Эксперт, получивший наибольшую оценку, предлагается системой в качестве кандидатуры руководителя остальным экспертам для утверждения. Если одинаковые наибольшие

оценки получили несколько экспертов, то в качестве кандидатуры система выбирает из них одного случайным образом.

В процессе формирования исходных данных для прогнозирования экспертам приходится согласовывать различные числовые значения используемых характеристик. Процедура согласования может быть организована следующим образом. Пусть в согласовании значения величины  $x_j$  принимают участие эксперты  $\mathcal{E}(1), \dots, \mathcal{E}(N)$ . Каждому эксперту система предлагает сделать оценку значения величины  $x_j$ . Оценки экспертов показаны в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Оценки экспертов

Эксперты	$\mathcal{E}(1)$	$\mathcal{E}(2)$	...	$\mathcal{E}(N)$
Оценка значения	$x_{j1}$	$x_{j2}$	...	$x_{jN}$

Далее система определяет:

$$(15) \bar{x}_j = \frac{\sum_i x_{ij}}{N} \text{ – среднее значение оценки;}$$

$$(16) D_j = \frac{1}{N-1} \sum_i (\bar{x}_j - x_{ij})^2 \text{ – дисперсию оценки;}$$

$$(17) P_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{\bar{x}_j} \text{ – профиль } i\text{-го эксперта.}$$

Затем система вычисляет скорректированные средние оценки  $x_j^*$  по следующему правилу.

- Если дисперсия невелика, то находится среднее значение и оно предлагается участникам для согласования.
- Если дисперсия большая, то анализируются профили участников.
- Если профиль участника «+» и его значение невелико, т.е. оценка участника выше среднего – ее значение уменьшается на  $0,1x_j$ .

- Если профиль участника «+» и его значение велико, т.е. оценка участника выше среднего – ее значение уменьшается на  $0,3x_j$ .
- Если профиль участника «-» и его значение невелико, т.е. оценка участника ниже среднего – ее значение увеличивается на  $0,1x_j$ .
- Если профиль участника «-» и его значение велико, т.е. оценка участника ниже среднего – ее значение увеличивается на  $0,3x_j$ .

Величины увеличения и уменьшения оценки эксперта ( $0,1x_j$ ,  $0,3x_j$ ) устанавливаются при настройке системы и могут пересматриваться. Понятие «большой» и «малой дисперсии» определяется в виде порогового значения, которое устанавливается заранее и может пересматриваться. Вычисленная скорректированная средняя оценка предлагается экспертам для согласования. Эксперты могут утвердить предложенное среднее в качестве оценки или продолжить согласование. Число итераций согласования устанавливается заранее и может пересматриваться.

#### *4.1. ФОРМИРОВАНИЕ СХЕМЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ И СХЕМЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА ПОДСИСТЕМЫ ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ*

Процедура формирования схемы инфраструктуры осуществляется экспертами отдельно для каждой подсистемы жизнеобеспечения (ПСЖ). Работу группы экспертов координирует руководитель.

Исходным материалом для формирования схемы инфраструктуры ПСЖ выступает информация о инфраструктуре ПСЖ, которая представлена в виде технической документации на ПСЖ, а также в виде знаний каждого эксперта.

Экспертам необходимо сформировать схему инфраструктуры ПСЖ в виде ориентированного графа, в котором вершины соответствуют блокам элементов инфраструктуры, а ребра – связям между блоками.

*1 этап.*

Система предлагает каждому эксперту  $\mathcal{E}(j)$ ,  $j = 1, \dots, N$ , сформировать множество блоков элементов инфраструктуры ПСЖ. Блоки описываются фразами, которые могут содержать количественные показатели, например:  $a_1 = \text{«Насосная станция второго подъема воды №1»}$ . При этом должны выполняться следующие условия:

- фразы, описывающие вершины, должны однозначно указывать на части инфраструктуры ПСЖ и пониматься экспертами (условие интерпретируемости);
- совокупность элементов инфраструктуры, объединенных в блоках, полностью отражает инфраструктуру ПСЖ (условие полноты).

*2 этап.*

Система предъявляет каждому эксперту  $\mathcal{E}(d)$ ,  $d = 1, \dots, N$ , набор множеств блоков элементов инфраструктуры ПСЖ, сформированных остальными экспертами:  $\{F_k, k = 1, 2, \dots, N, k \neq j\}$  и предлагает осуществить парные сравнения множеств блоков, предложенных остальными экспертами и проставить оценки в виде индексов  $\delta_{jkd}$ , характеризующих степень предпочтительности множества блоков  $j$ -го члена группы относительно множества блоков  $k$ -го с субъективной точки зрения  $d$ -го члена группы,  $j, k = 1, N$ . При этом предполагается, что член группы  $d$  не сравнивает своё множество с другими, т.е.  $j \neq d, k \neq d$ . Индекс  $\delta_{jkd}$  выставляется в соответствии с таблицей 4.3. При этом выполняется правило:  $\delta_{kjd} = -\delta_{jkd}$ .

Таблица 4.3. Шкала сравнений степени предпочтительности схем, предложенных экспертами

Лингвистическая шкала	Значение индекса $\delta_{jkd}$
Множество $F_j$ значительно предпочтительней множества $F_k$	+8
Множество $F_j$ существенно предпочтительней множества $F_k$	+6
Множество $F_j$ предпочтительней множества $F_k$	+4
Множество $F_j$ немного предпочтительней множества $F_k$	+2
Множество $F_j$ эквивалентно множества $F_k$	0

Затем строится вектор  $P = (P_1, P_2, \dots, P_N)$ ,  $P_i > 0$  оценок предпочтительности предложенных экспертами множеств блоков с помощью регрессии (18), минимизирующей разницу между отношениями  $P_j/P_k$  и  $\delta_{jkd}$ :

$$(18) \sum_{j < k} \sum_d (P_j / P_k - \delta_{jkd})^2 .$$

3 этап.

Множество, получившее наибольшую оценку предпочтительности, предлагается руководителю для утверждения в качестве согласованного множества блоков элементов инфраструктуры ПСЖ. Если одинаковые наибольшие оценки получили несколько множеств, то в качестве варианта для утверждения компьютерная система выбирает для утверждения руководителем одно из них случайным образом.

Получив вариант множества для утверждения, руководитель может внести свои изменения. Утвержденное руководителем множество принимается в качестве согласованного множества блоков элементов инфраструктуры – множества вершин схемы инфраструктуры ПСЖ.

4 этап.

На четвертом этапе процедуры эксперты определяют и согласовывают существование отношений влияния между блоками элементов инфраструктуры. Два блока элементов инфраструктуры  $a_i$  и  $a_j$  связаны отношением влияния, если повреждение блока  $a_i$  вызывает повреждение блока  $a_j$ . Система предъявляет каждому эксперту пары блоков элементов инфраструктуры и предлагает указать оценку для каждой предъявленной пары  $(a_i, a_j)$  по следующему правилу: если отношение влияния имеет место, то эксперт ставит «+», если нет, то «-». Пары предъявляются экспертам в случайном порядке, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления.

После получения ответов от всех экспертов в системе формируется сводная таблица ответов, см. таблицу 4.4.

Таблица 4.4. Сводная таблица ответов

Пары ( $a_i, a_j$ )	Эксперты			Результат	
	Э(1)	...	Э(N)	«+»	«-»
( $a_1, a_2$ )	+	...	-	$N_{12}$	$N - N_{12}$
( $a_1, a_3$ )	-	...	+	$N_{13}$	$N - N_{13}$
...	...	...	...	...	...
( $a_i, a_j$ )	+	...	+	$N_{ij}$	$N - N_{ij}$
...	...	...	...	...	...

Здесь  $N_{ij}$  равны числу плюсов в строке, соответствующей паре  $(a_i, a_j)$  (числу экспертов, которые указали существование отношения влияния для пары  $(a_i, a_j)$ ).

Далее система производит обработку сводной таблицы по следующему правилу: считается, что блок  $a_i$  оказывает влияние на блок  $a_j$ , если число  $N_{ij} > \beta N$ . Значение величины  $0 < \beta < 1$  устанавливается при наладке системы и может пересматриваться. Результат обработки предъявляется экспертам в виде схемы инфраструктуры ПСЖ.

Схема технологического процесса ПСЖ формируется при помощи аналогичной процедуры.

#### 4.2. ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ВОЗМОЖНЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА БЛОКИ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Произвольный фактор воздействия представлен в системе в виде набора  $(W_i, h_{\max}, V_{\max}, t, T)$ , используемые обозначения совпадают с обозначениями раздела 3.1.

Формирование множества  $\{W_1, \dots, W_h\}$  осуществляется экспертами при помощи процедуры, которая организована следующим образом.

На *первом шаге* руководитель формирует множество зон  $\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$ , удовлетворяющее условию: в каждую зону попадает один блок элементов инфраструктуры, представленный в схеме инфраструктуры. В качестве подсказки в систему может быть введено множество зон, которые являются частями территории расположения ПСЖ.

На *втором шаге* система предъявляет экспертам построенное руководителем множество и предлагает каждому эксперту ответить на вопрос: «Какие пары зон могут быть, по его мнению, объединены в одну?». Система предъявляет эксперту пары зон в случайном порядке, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления. Эксперт заносит свои ответы в таблицу по следующему правилу: если пара  $(W_\alpha^0, W_\beta^0)$  может быть объединена в одну зону, то эксперт ставит знак «+», если нет, то знак «-». В результате ответов каждого эксперта система сформирует сводную таблицу 4.5

На *третьем шаге* система производит обработку сводной таблицы по следующему правилу: считается, что зоны  $W_\alpha^0, W_\beta^0$  могут быть объединены в одну зону, если число  $N_{\alpha\beta} > \rho N$  (значение величины  $0 < \rho < 1$  устанавливается при наладке системы и может пересматриваться). В этом случае в столбце «согласованная оценка» ставится знак «+». В противном случае – знак «-».

Таблица 4.5. Сводная таблица ответов экспертов

Согласованная оценка	Пары зон	Эксперты			Результат Количество «+»
		Э(1)	...	Э(N)	
+	$(W_1^0, W_2^0)$	-	...	+	$N_{12}$
...	...	...	...	...	...
-	$(W_\alpha^0, W_\beta^0)$	+	...	+	$N_{\alpha\beta}$
...	...	...	...	...	...

На четвертом шаге система строит граф  $G\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$ , по правилу:

- множество вершин графа составляет множество  $\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$ ;
- вершины  $W_\alpha^0, W_\beta^0$  соединены ребром только, если «согласованная оценка» = «+».

Далее граф  $G\{W_1^0, \dots, W_h^0\}$ , разбивается на компоненты связности  $C_1(G) \cup C_2(G) \cup \dots \cup C_q(G)$ . Каждая компонента связности  $C_p(G)$  порождает новый элемент:  $W_p^0 = \cup W_i^0$ , объединение осуществляется по всем вершинам  $W_i^0 \in C_p(G)$ . Полученное в результате множество  $\{W_1, \dots, W_p\}$  выбирается в качестве согласованного множества зон расположения ПСЖ.

Для каждого из параметров  $(h_{\max}, V_{\max}, t, T)$  формируется дискретная шкала значений (19), которая устанавливается экспертами при помощи изложенной в начале раздела процедуры согласования на основе понятия профиля. В качестве подсказки значений дискретных шкал система предлагает экспертам таблицы вида 3.3, которые вводятся в систему на этапе настройки.

$$(19) (h_{\max} = h^1, h^2, \dots; V_{\max} = V^1, V^2, \dots; t = t^1, t^2, \dots; T = T^1, T^2, \dots,)$$

В результате выполнения перечисленных операций в системе сформировано множество возможных факторов воздействия  $\{\Phi_1, \dots, \Phi_s\}$ , в котором каждый фактор воздействия представляет собой набор  $(W_i, h^p, V^q, t^s, T^t)$ .



### 4.3. ФОРМИРОВАНИЕ ТАБЛИЦ СТЕПЕНЕЙ ПОВРЕЖДЕНИЯ БЛОКОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ И ВЕСОВ ВОЗДЕЙСТВИЙ ФАКТОРОВ

Таблицы степеней повреждения блоков элементов инфраструктуры и веса воздействий формируются совместно для каждого фактора воздействия.

Система предлагает каждому эксперту  $\mathcal{E}(j)$ ,  $j = 1, \dots, N$ , заполнить таблицу 4.6.

Таблица 4.6. Таблица степеней повреждения и весов воздействия для блоков элементов инфраструктуры

	Фактор $\Phi_1$		...	Фактор $\Phi_\xi$	
	Степень повреждения	Вес воздействия		Степень повреждения	Вес воздействия
Блок элементов инфраструктуры $a_1$	$d_j(a_1, \Phi_1)$	$\varphi_j(a_1, \Phi_1)$	...	$d_j(a_1, \Phi_\xi)$	$\varphi_j(a_1, \Phi_\xi)$
Блок элементов инфраструктуры $a_2$	$d_j(a_2, \Phi_1)$	$\varphi_j(a_2, \Phi_1)$	...	$d_j(a_2, \Phi_\xi)$	$\varphi_j(a_2, \Phi_\xi)$
...	...	...	...	...	
Блок элементов инфраструктуры $a_k$	$d_j(a_k, \Phi_1)$	$\varphi_j(a_k, \Phi_1)$	...	$d_j(a_k, \Phi_\xi)$	$\varphi_j(a_k, \Phi_\xi)$

В этой таблице величины  $d_j(a_k, \Phi_\xi)$  и  $\varphi_j(a_k, \Phi_\xi)$  равны, по мнению эксперта  $\mathcal{E}(j)$ , соответственно степени повреждения блока элементов инфраструктуры  $a_k$  для фактора воздействия  $\Phi_\xi$  и весу воздействия фактора  $\Phi_\xi$  на блок элементов инфраструктуры  $a_k$ . Для формирования подсказки экспертам в системе предусмотрена автоматическая оценка степеней повреждения на основе таблиц вида 3.3. Экспертам предъявляется подсказка в виде таблицы вида 4.6, в которой приведены результаты автоматической оценки степеней повреждения блоков элементов

инфраструктуры. Система предлагает экспертам внести коррективы в результаты автоматической оценки, если они считают это необходимым.

Далее система автоматически обрабатывает экспертную информацию: в качестве согласованных оценок степени повреждения блока элементов инфраструктуры  $a_k$  для фактора воздействия  $\Phi_\xi$  и веса воздействия фактора  $\Phi_\xi$  на блок элементов инфраструктуры  $a_k$  принимаются, соответственно, величины

$$(20) \quad d(a_k, \Phi_\xi) = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{1}{N} \sum_j d_j(a_k, \Phi_\xi) < d_0, \\ 1, & \text{если } d_0 < \frac{1}{N} \sum_j d_j(a_k, \Phi_\xi) < d_1, \\ 2, & \text{если } d_1 < \frac{1}{N} \sum_j d_j(a_k, \Phi_\xi); \end{cases}$$

$$\phi(a_k, \Phi_\xi) = \frac{1}{N} \sum_j \phi_j(a_k, \Phi_\xi);$$

где значения пороговых величин  $d_0, d_1$  удовлетворяют условию  $0 < d_0 < d_1 < 2$  и выбираются при наладке системы.

#### 4.4. ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИЙ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Формирование набора величин  $h_{ij}(d(a_i))$  – функций влияния, определяющих величину влияния повреждения блока элементов инфраструктуры ПСЖ на другие блоки, осуществляется следующим образом.

Система предъявляет каждому эксперту пары блоков элементов инфраструктуры, для которых ранее (см. раздел 4.1) установлено отношения влияния, и предлагает указать для каждой предъявленной пары  $(a_i, a_j)$  оценку функции влияния  $h_{ij}(d(a_i))$ . Пары предъявляются экспертам в случайном порядке, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления. Для каждой предъявленной пары  $(a_i, a_j)$  эксперт  $\Xi(l)$  указывает величины  $h_{ij}^l(1), h_{ij}^l(2)$  (смысл величин определен в разделе

3.2). После получения ответов от всех экспертов в системе формируется таблица экспертных оценок функций влияния, см. таблицу 4.7.

Таблица 4.7. Таблица экспертных оценок функций влияния

Пары ( $a_i, a_j$ )	Эксперты				
	$\Xi(1)$	...	$\Xi(j)$	...	$\Xi(N)$
$(a_1, a_2)$	$h_{12}^1(1)$	...	$h_{12}^j(1)$	...	$h_{12}^N(1)$
	$h_{12}^1(2)$	...	$h_{12}^j(2)$	...	$h_{12}^N(2)$
...	...	...	...	...	...
$(a_i, a_j)$	$h_{ij}^1(1)$	...	$h_{ij}^j(1)$	...	$h_{ij}^N(1)$
	$h_{ij}^1(2)$	...	$h_{ij}^j(2)$	...	$h_{ij}^N(2)$
...	...	...	...	...	...

Далее система автоматически обрабатывает экспертную информацию: в качестве согласованных оценок функции влияния для пары ( $a_i, a_j$ ) принимаются величины (21).

$$(21) \quad h_{ij}(d) = \begin{cases} 1, & \text{если } \frac{1}{N} \sum_l h_{ij}^l(d) < h \\ 2, & \text{если } h < \frac{1}{N} \sum_l h_{ij}^l(d) \end{cases}, \quad d = 1, 2,$$

Значения пороговой величины  $h$  удовлетворяет условию  $0 < h < 2$  и устанавливается при наладке системы.

#### 4.5. ФОРМИРОВАНИЕ МНОЖЕСТВА ЗНАЧИМЫХ ФАКТОРОВ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЭЛЕМЕНТЫ ИНФРАСТРУКТУРЫ

Сформированное на предшествующих этапах множество возможных факторов воздействия  $\{\Phi_1, \dots, \Phi_s\}$  избыточно, так как содержит факторы воздействия, которые в реальных ситуациях либо никогда не реализуются, либо их воздействие незначительно. По этой причине во множестве возможных факторов выделяется подмножество значимых факторов воздействия. Процедура выделения приведена в настоящем разделе.

Определение набора значимых факторов осуществляется на основе моделирования наката волны на береговую зону. В моделировании цунами можно выделить три этапа вычислений в соответствии с основными этапами этого явления. Первый этап вычислений связан с анализом формирования начальных возмущений свободной поверхности океана и распространения их вблизи очага землетрясения, второй – с изучением распространения волн цунами в открытом океане, и, наконец, на третьем этапе моделируется выход волн на мелководье и их взаимодействие с берегом.

Широко используемый подход к изучению процесса возбуждения цунами заключается в использовании в качестве модели среды слоя сжимаемой жидкости, лежащего на упругом полупространстве, а в качестве уравнения движения – уравнения Ляме с учетом гравитационных составляющих. Колебания жидкости и подстилающего полупространства вычисляются при этом как решение прямой динамической задачи о возбуждении волн модельным пространственным источником с движущимся разрывом, помещенным внутри упругого полупространства. Поскольку в уравнениях движения и в граничных условиях учитывается сила тяжести, в решении присутствуют не только сейсмические, но и гравитационные волны, в том числе волны цунами. Это позволяет провести совместный анализ условий их возбуждения для того, чтобы выяснить наличие физических связей или корреляции между ними, которую можно было бы использовать для прогноза цунами.

Математическая постановка задачи имеет следующий вид. Слой однородной сжимаемой жидкости (воды) располагается на однородном упругом полупространстве (породы земной коры) и находится в однородном поле силы тяжести. Пусть  $H$  – толщина слоя жидкости (глубина океана). На глубине  $h$  под дном находится модельный источник – очаг землетрясения. Уравнение Ляме имеют вид (22):

$$(22) \quad V_0 \operatorname{grad} \operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} - g \operatorname{div} \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{k}} = \partial^2 \bar{\mathbf{u}} / \partial t^2, \quad 0 < z \leq H,$$

$$\bar{\mathbf{F}}(r, \theta, z, t) + (V_p^2 - V_S^2) \text{grad div } \bar{\mathbf{u}} + V_S^2 \Delta \bar{\mathbf{u}} - g \text{div } \bar{\mathbf{u}} \cdot \bar{\mathbf{k}} = \partial^2 \bar{\mathbf{u}} / \partial t^2, z > H,$$

граничные условия на свободной поверхности и дне океана:

$$(23) \begin{cases} [V_0 \text{div } \bar{\mathbf{u}} - gu_z]_{z=+0} = 0, \\ [u_z]_{z=H+0} = [u_z]_{z=H-0}, \\ \left[ \frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right]_{z=H+0} \left[ \frac{1}{r} \frac{\partial u_z}{\partial \theta} + \frac{\partial u_\theta}{\partial z} \right]_{z=H+0} = 0, \\ \left[ (V_p^2 - 2V_S^2) \text{div } \bar{\mathbf{u}} + 2V_S^2 \frac{\partial u_z}{\partial z} - gu_z \right]_{z=H+0} = \frac{\rho_0}{\rho_1} [V_0^2 \text{div } \bar{\mathbf{u}} - gu_z]_{z=H-0}. \end{cases}$$

где  $\bar{\mathbf{u}}(r, \theta, z, t) = \{u_r, u_z, u_\theta\}$  – вектор смещения частиц среды относительно некоторого начального состояния статического равновесия в гравитационном поле;  $g$  – ускорение силы тяжести;  $\bar{\mathbf{k}}$  – орт по оси  $z$ ;  $\rho_0$  – плотность воды;  $V_0$  – скорость звука в воде;  $\bar{\mathbf{F}}$  – функция источника;  $\rho_1, V_p, V_S$  – плотность, скорость продольных и поперечных волн в упругом полупространстве соответственно; ось  $Oz$  направлена вертикально вниз.

Начальные условия принимаются нулевыми. В момент времени  $t = 0$  включается источник, в качестве которого принимаются вертикальная и горизонтальная единичные сосредоточенные силы, приложенные внутри упругого полупространства в точке с координатами  $(0, 0, H + h)$ .

Результаты расчетов генерации волн цунами в рамках сформулированной математической модели, в дальнейшем используются в качестве начальных данных для численного моделирования распространения этих волн на реальных участках акватории океана.

При моделировании распространения волн цунами рассматривается идеальная несжимаемая жидкость, находящаяся в однородном поле сил тяжести. Течение предполагается потенциальным, т. е. для вектора скорости  $\bar{\mathbf{u}} = \{u, v, w\}$  существует функция  $\varphi(x, z, y, t)$  такая, что  $\bar{\mathbf{u}} = \text{grad } \varphi$ . Здесь  $u, v, w$  – компоненты вектора скорости по направлениям  $x, y, z$  соответственно. Ось  $Oz$  направлена вертикально вверх в сторону, противополо-

ложную направлению ускорения свободного падения, а невозможная свободная поверхность совпадает с горизонтальной плоскостью  $XOY$ . Считается, что жидкость заполняет собой некоторую область  $Q_T$ , ограниченную сверху свободной поверхностью  $z = \eta(x, y, t)$ , а снизу – дном (24):

$$(24) \quad z = -\tilde{H}(x, y, t) = -H(x, y) + B(x, y, t).$$

Традиционный подход к моделированию волн на воде, обусловленных гравитационными эффектами, состоит в формулировке задачи в терминах потенциала течения несжимаемой идеальной однородной жидкости, удовлетворяющего уравнению Лапласа (25) и граничным условиям на свободной поверхности и на дне:

$$(25) \quad \Delta\varphi = \varphi_{xx} + \varphi_{yy} + \varphi_{zz} = 0 \text{ при } (x, y, z, t) \in Q_T$$

Кинематическое краевое условие, имеющее вид (26), следует из предположения, что частица жидкости, находившаяся в начальный момент времени на свободной поверхности, остается на ней в течение всего процесса.

$$(26) \quad \varphi_x \eta_x + \varphi_y \eta_y - \varphi_z + \eta_t = 0, \text{ при } z = \eta(x, y, t).$$

Аналогичное кинематическое условие формулируется и на дне:

$$(27) \quad \varphi_x \tilde{H}_x + \varphi_y \tilde{H}_y + \varphi_z + \tilde{H}_t = 0, \text{ при } z = -\tilde{H}(x, y, t).$$

Динамическое краевое условие на свободной поверхности формулируется, исходя из того, что давление  $p$  сохраняет на ней постоянное значение, равное атмосферному:

$$(28) \quad p = p_a = 0, \text{ при } z = \eta(x, y, t).$$

Так как рассматриваемое движение потенциально, давление внутри жидкости может быть определено из интеграла Бернулли (29), где  $g$  — ускорение силы тяжести,  $\rho$  — плотность жидкости, а  $f(t)$  — произвольная функция времени, которая может быть присоединена к функции  $\varphi(x, y, z, t)$ .

$$(29) \quad p/\rho = \varphi_t - gz - \frac{1}{2} |\nabla\varphi|^2 + f(t),$$

Из интеграла Бернулли для точек свободной поверхности жидкости, следует (30), где все производные от потенциала  $\phi$  вычисляются на свободной поверхности  $z = \eta(x, y, t)$ .

$$(30) \phi_t - \frac{1}{2}(\phi_x^2 + \phi_y^2 + \phi_z^2) - g\eta = \text{const.}$$

В начальный момент времени задаются также форма свободной поверхности (31) и начальное распределение потенциала скоростей (32), причем функция  $\phi_0(x, y, z)$  должна удовлетворять уравнению Лапласа.

$$(31) \eta(x, y, 0) = \eta_0(x, y),$$

$$(32) \phi(x, y, z, 0) = \phi_0(x, y, z).$$

Формулировка задачи в терминах компонент скоростей приводит к системе уравнений Эйлера (33), уравнению неразрывности (34) и условиям отсутствия вихря (35), выполняющимся во внутренних точках области  $Q_T$ :

$$u_t + uu_x + vv_y + ww_z = -(1/\rho)p_x,$$

$$(33) v_t + uv_x + vw_y + ww_z = -(1/\rho)p_y,$$

$$w_t + uw_x + vw_y + ww_z = -(1/\rho)p_z - g,$$

$$(34) u_x + v_y + w_z = 0$$

$$(35) u_y = v_x, v_z = w_y, u_z = w_x.$$

Граничные условия переписываются в форме (36), а краевое условие принимает вид (37):

$$(36) \eta_t + u\eta_x + v\eta_y - w = 0, p = 0, \quad \text{при } z = \eta(x, y, t),$$

$$(37) u\tilde{H}_x + v\tilde{H}_y + w = -\tilde{H}_t, \quad \text{при } z = -\tilde{H}(x, y, t).$$

В начальный момент времени задаются распределение скоростей  $\vec{u}(x, y, z, 0) = \vec{u}_0(x, y, z)$  и положение свободной поверхности  $\eta(x, y, 0) = \eta_0(x, y)$ .

Приведенные модели применяются в блоке моделирования наката волны на берег, представляющем собой программный комплекс, построенный на основе следующих модулей:

- математическая модель – система уравнений со своим набором «гидродинамических» параметров: начальных данных, граничных условий, батиметрии, формы границ, рельефа суши, шероховатости, ветрового трения, коэффициентов турбулентного перемешивания и др., а также «математических» параметров – величин, вносимых при выводе уравнений;

- вычислительный алгоритм, аппроксимирующего уравнения математической модели со своими параметрами пространственной и временной дискретизации, схемной и искусственной вязкости и дисперсии, с «дополнительными» граничными условиями, и др.;

- препроцессор, перерабатывающий сценарии подхода волны цунами к береговой зоне в соответствующие «гидродинамические» параметры с целью их адаптации к особенностям вычислительного алгоритма (постановка начальных и краевых условий, пересчет на альтернативные сетки, модификация границ, интерполяция и т.п.);

- блок управления расчетом, отслеживающий нештатные ситуации, возникающие в процессе вычислений (особенно при длительном моделировании) – потеря устойчивости и т.п., и вносящего (автоматически или через пользовательский интерфейс) необходимые изменения параметров вычислительного алгоритма (вплоть до замены модели и алгоритма), обеспечивающего заданное пользователем накопление результатов для последующей обработки и интерпретации и оперативное представление критически важной оперативной информации о динамике моделируемого явления или о ходе вычислений и др.;

- блок отображения, который обрабатывает результаты моделирования, вычисляет необходимые функционалы решения, обеспечивает качественную визуализацию и, при необходимости, выдает в указанные телекоммуникационные каналы автоматически генерируемые сообщения различного объема и характера. Эти же алгоритмы осуществляют отбор и сортировку информации для последующего анализа, ее архивирование и передачу на долговременное хранение.



Процедура оценки набора значимых факторов воздействия на инфраструктуры отдельных подсистем жизнеобеспечения выполняется на этапе наладки системы, ее схема приведена на рис. 4.1.

На первом этапе на основе знаний сейсмотектонических особенностей цунамигенных зон тихоокеанского региона (в виде набора функций источника  $\vec{F}$ ).

На втором этапе моделируется набор начальных данных для численного моделирования распространения волн на реальных участках акватории океана.

На третьем этапе вычисляются сценарии подхода волн цунами к береговой зоне.

На четвертом этапе моделируются возможные сценарии накат волн на береговую зону. В результате выполнения этого этапа для каждого сценария наката волн цунами для каждой зоны  $W_i$  вычисляются максимальная глубина затопления от волны цунами –  $h_{\max}$ , м; максимальная скорость течения воды в волне –  $V_{\max}$ , м/с; температура воды в волне –  $t$ , град.; время существования волны (продолжительность затопления) –  $T$ , ч.

На пятом этапе на основе оценок, полученных на предыдущем этапе, оцениваются значения степеней повреждения  $d(a, \Phi_\xi)$  (для каждого фактора воздействия  $\Phi_\xi$  и блока элементов инфраструктуры  $a$ ). Далее система определяет  $\Xi$  – множество блоков элементов инфраструктуры ПСЖ, которые могут подвергнуться прямому воздействию волн цунами. Фактор  $\Phi_\xi$  включается во множество значимых (в складывающейся ситуации) факторов, если существует блок  $a \in \Xi$ , для которого  $d(a, \Phi_\xi) \geq 1$ .

При использовании системы в оперативном режиме набор значимых факторов воздействия на инфраструктуры подсистем жизнеобеспечения можно уточнить на основе информации, поступающей от системы раннего обнаружения цунами (данные глубоководных датчиков, спутниковая информация).

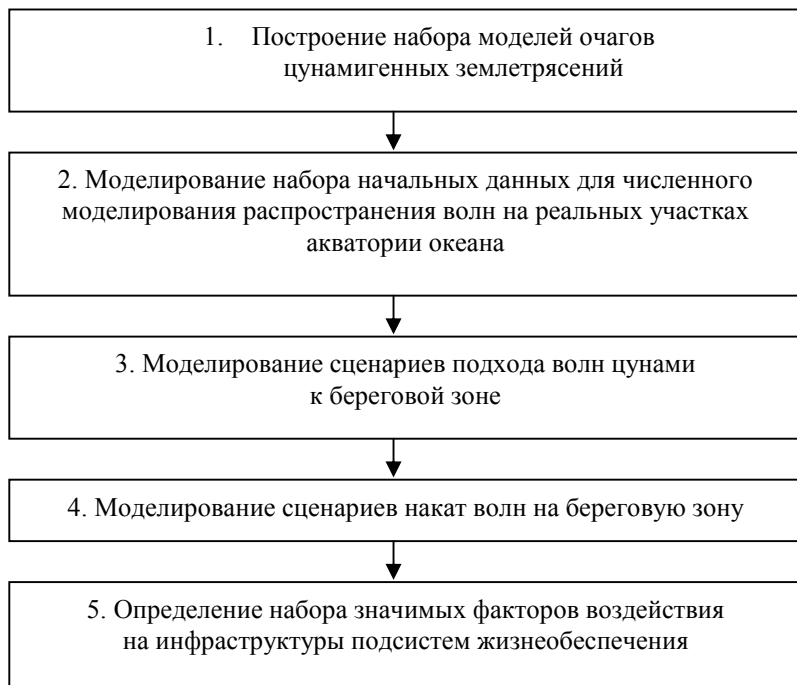


Рис. 4.1. Процедура оценки набора значимых факторов

#### 4.6. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОПЕРАЦИЙ И РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Выбор технологических параметров операций, представленных в схеме технологического процесса, осуществляется экспертами последовательно в порядке следования операций.

На *первом этапе* процедуры эксперты решают задачу выбора параметров для технологических операций. В соответствии с формальным представлением технологического процесса вектор значений технологических параметров должен быть сопоставлен каждому ориентированному ребру  $P_{ij}$ , идущему от операции  $A_i$  к операции  $A_j$  (см. раздел 3.3).

Сначала система предлагает экспертам указать как можно больше параметров, связанных с рассматриваемым ребром  $P_{ij}$ . Все ответы экспертов система объединяет общий список.

Далее осуществляется ограничение числа параметров в соответствии с оценками их важности. Система предлагает экспертам оценить каждый параметр по двум критериям: «абсолютная важность» и «относительная важность». Абсолютная важность оценивается по 5-балльной шкале, см. таблицу 4.8.

Таблица 4.8. Шкала абсолютной важности

Лингвистическая шкала	Числовая оценка
Исключительно важный параметр	5
Использование параметра необходимо	4
Использование параметра желательно	3
Использование параметра возможно	2
Параметр значения не имеет	1

Относительная важность оценивается по 100-балльной шкале. Параметры сравниваются экспертом между собой. Выбирается самый важный, по его мнению, параметр и ему присваивается балл 100. Остальные параметры сравниваются с самым важным параметром и для них выставляются баллы, имеющие смысл относительной оценки.

Далее система обрабатывает оценки экспертов и вычисляет для каждого параметра среднее значение (по всем экспертам) абсолютной и относительной важности. Затем из списка удаляются все параметры, которые имеют среднее значение абсолютной важности менее  $ABS_{кр}$  или среднее значение относительной важности менее  $REL_{кр}$ . Значения величин  $1 \leq ABS_{кр} \leq 5$ ,  $0 \leq REL_{кр} \leq 100$  устанавливаются при наладке системы. В результате выполнения первого шага в системе сформирован согласованный вектор параметров  $X_{ij}$ .

На *втором этапе* процедуры эксперты решают задачу выбора  $\mathfrak{I}_{ij}^0, \mathfrak{I}_{ij}^1, \mathfrak{I}_{ij}^2$  – множеств значений вектора параметров  $X_{ij} = (x_{ij}^1, \dots, x_{ij}^{m(i,j)})$  ( $\mathfrak{I}_{ij}^0$  – нормальный режим функционирования

ния,  $\mathfrak{S}_{ij}^1$  – аварийный режим функционирования,  $\mathfrak{S}_{ij}^2$  – разрыв связи между технологическими операциями  $A_i$  и  $A_j$ , см. раздел 3.3).

На *первом шаге* система предлагает экспертам для каждой компоненты  $x_{ij}^\beta$  вектора  $X_{ij}$  указать критические значения (38) такие, что:

- множество (38) соответствует разрыву связи между технологическими операциями  $A_i$  и  $A_j$ ;
- множество (40) соответствует аварийному режиму функционирования;
- множество (41) соответствует нормальному режиму функционирования.

$$(38) \quad I_1^-(x_{ij}^\beta) < I_0^-(x_{ij}^\beta) < I_0^+(x_{ij}^\beta) < I_1^+(x_{ij}^\beta),$$

$$(39) \quad \left\{ x \mid x < I_1^-(x_{ij}^\beta) \right\} \cup \left\{ x \mid x > I_1^+(x_{ij}^\beta) \right\},$$

$$(40) \quad \left\{ x \mid I_1^-(x_{ij}^\beta) < x < I_0^-(x_{ij}^\beta) \right\} \cup \left\{ x \mid I_0^+(x_{ij}^\beta) < x < I_1^+(x_{ij}^\beta) \right\},$$

$$(41) \quad \left\{ x \mid I_0^-(x_{ij}^\beta) < x < I_0^+(x_{ij}^\beta) \right\}.$$

На *втором шаге* система обрабатывает ответы экспертов: в качестве (38) – согласованных критических значений компоненты  $x_{ij}^\beta$  – принимаются результаты усреднения по всем ответам, т.е. если эксперт  $\Xi(p)$ ,  $p = 1, \dots, N$ , указал значения (42), то

$$(42) \quad I_{1,p}^-(x_{ij}^\beta) < I_{0,p}^-(x_{ij}^\beta) < I_{0,p}^+(x_{ij}^\beta) < I_{1,p}^+(x_{ij}^\beta),$$

$$(43) \quad I_v^\sigma(x_{ij}^\beta) = \frac{1}{N} \sum_p I_{v,p}^\sigma(x_{ij}^\beta), \quad \sigma \in \{+, -\}, \quad v \in \{0, 1\}.$$

В результате для компоненты  $x_{ij}^\beta$  вектора  $X_{ij}$  в системе будут сформированы согласованные критические значения, определяющие режимы функционирования.

На *третьем шаге* система строит искомые множества  $\mathfrak{S}_{ij}^0$ ,  $\mathfrak{S}_{ij}^1$ ,  $\mathfrak{S}_{ij}^2$  по следующему правилу:

$$\mathfrak{S}_{ij}^0 = \prod_{\beta=1}^{m(i,j)} \left\{ x \mid I_0^-(x_{ij}^\beta) < x < I_0^+(x_{ij}^\beta) \right\},$$

$$(44) \mathfrak{Z}_{ij}^2 = \left\{ X_{ij} \mid \exists \beta : x_{ij}^\beta \in \left\{ x \mid x < I_1^-(x_{ij}^\beta) \right\} \cup \left\{ x \mid x > I_1^+(x_{ij}^\beta) \right\} \right\},$$

$$\mathfrak{Z}_{ij}^1 = \left\{ X_{ij} \mid X_{ij} \notin \mathfrak{Z}_{ij}^0 \cup \mathfrak{Z}_{ij}^2 \right\}.$$

#### 4.7. ФОРМИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОПЕРАЦИЙ

Выбор технологических характеристик операций (см определение в разделе 3.3) осуществляется экспертами последовательно в порядке следования операций в соответствии со схемой технологического процесса.

Пусть рассматривается операция  $A_j$ , для которой в графе технологического процесса имеются входные стрелки  $P_{\lambda(1)j}, \dots, P_{\lambda(k)j}$  и входные стрелки  $P_{j\mu(1)}, \dots, P_{j\mu(l)}$ , см. рис. 3.2. Система предлагает каждому эксперту для значения качества выполнения операции  $Q(A_j) = 1$  заполнить таблицу соответствий:

$$(45) \left( \mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left( \mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right),$$

$$\alpha(p) \in \{0, 1\}, \beta(q) \in \{0, 1\},$$

$$p = 1, \dots, k, q = 1, \dots, l.$$

Заполнение осуществляется экспертом по мере предъявления ему комбинаций  $\left( \mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right)$ . Последовательность предъявления является случайной, чтобы минимизировать эффект воздействия порядка предъявления. Если для комбинации  $\left( \mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right)$  эксперты  $\mathfrak{E}(p)$ ,  $p = 1, \dots, N$ , выбрали комбинации  $\left( \mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1,p)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l,p)} \right)$ , то система выбирает в качестве согласованного соответствия

$$\left( \mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left( \mathfrak{Z}_{j\mu(1)}^{\beta(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{j\mu(l)}^{\beta(l)} \right), \text{ где } \beta(s) = \max_{p \in \{1, \dots, N\}} \beta(s, p).$$

Если у комбинации  $\left( \mathfrak{Z}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{Z}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right)$  хотя бы одно значение  $\alpha(s) = 2$ , то система автоматически устанавливает соответствие:

$$\left( \mathfrak{F}_{\lambda(1)j}^{\alpha(1)}, \dots, \mathfrak{F}_{\lambda(k)j}^{\alpha(k)} \right) \mapsto \left( \mathfrak{F}_{j\mu(1)}^2, \dots, \mathfrak{F}_{j\mu(l)}^2 \right).$$

Кроме того, очевидно, что

$$\left( \mathfrak{F}_{\lambda(1)j}^0, \dots, \mathfrak{F}_{\lambda(k)j}^0 \right) \mapsto \left( \mathfrak{F}_{j\mu(1)}^0, \dots, \mathfrak{F}_{j\mu(l)}^0 \right).$$

#### 4.9. ФОРМИРОВАНИЕ МАТРИЦ ВОЗДЕЙСТВИЙ БЛОКОВ ЭЛЕМЕНТОВ ИНФРАСТРУКТУРЫ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОПЕРАЦИИ

Матрицы воздействий блоков элементов инфраструктуры на технологические операции формируются последовательно для всех блоков, представленных в схеме инфраструктуры ПСЖ. Пусть система выбирала блок элементов инфраструктуры  $a_i$ ,  $i = 1, 2, \dots$ .

Система предлагает каждому эксперту  $\mathfrak{E}(j)$ ,  $j = 1, \dots, N$ , заполнить таблицу 4.9, в которой величина  $Q_{\omega}^k(a_i, j)$  равна, по мнению эксперта  $\mathfrak{E}(j)$ , качеству выполнения технологической операции  $A_k$  при условии, что блок элементов инфраструктуры  $a_i$  имеет повреждение  $d(a_i) = \omega$ . В результате в системе сформировано  $N$  матриц воздействий с экспертными оценками качества выполнения технологических операций.

Таблица 4.9. Матрица воздействий блока элементов инфраструктуры  $a_i$  на технологические операции

	Шкала степеней повреждения блока $a_i$		
	Повреждение отсутствует $d(a_i) = 0$	Среднее повреждение $d(a_i) = 1$	Полное разрушение $d(a_i) = 2$
Операция $A_1$	0	$Q_1^1(a_i, j)$	$Q_2^1(a_i, j)$
Операция $A_2$	0	$Q_1^2(a_i, j)$	$Q_2^2(a_i, j)$
...	0	...	...
Операция $A_k$	0	$Q_1^k(a_i, j)$	$Q_2^k(a_i, j)$
...	0	...	...

Далее система автоматически обрабатывает экспертную информацию: в качестве согласованной оценки качества выполнения технологической операции  $A_k$  при условии, что блок

элементов инфраструктуры  $a_i$  имеет повреждение  $d(a_i) = \omega$ , принимается величина (46), значения пороговых величин  $q_0, q_1$  удовлетворяют условию  $0 < q_0 < q_1 < 2$  и выбираются при наладке системы

$$(46) \quad Q_{\omega}^k(a_i) = \begin{cases} 0, & \text{если } \frac{1}{N} \sum_j Q_{\omega}^k(a_i, j) < q_0, \\ 1, & \text{если } q_0 < \frac{1}{N} \sum_j Q_{\omega}^k(a_i, j) < q_1, \\ 2, & \text{если } q_1 < \frac{1}{N} \sum_j Q_{\omega}^k(a_i, j). \end{cases}$$

## 5. Заключение

Представленная в работе система может использоваться для решения следующих задач:

1. Прогнозирования состояния системы жизнеобеспечения в условиях чрезвычайной ситуации, вызванной воздействием волн цунами.
2. Моделирования возможных состояний системы жизнеобеспечения, которые могут возникнуть в результате реализации гипотетических сценариев воздействия волн цунами.

Использование системы для осуществления экспертного прогнозирования последствий повреждения систем жизнеобеспечения при воздействии волн цунами позволяет осуществить учет различных точек зрения при формировании вариантов прогноза и обеспечивает его выработку практически в реальном масштабе времени.

При выработке решений по разработке мер, направленных на обеспечение безопасности населения и хозяйственной деятельности в прибрежных районах и уменьшение возможного ущерба от цунами, результаты экспертного прогнозирования поведения систем жизнеобеспечения позволяют обнаружить неприемлемые и ошибочные решения, а также вводить в соот-

ветствии со складывающейся обстановкой необходимые коррективы в составленные ранее планы.

### Литература

1. ГАСАНОВ А. З., РЫЖОВ И. В., ЧЕБОТАРЕВ С. С. *Экономические последствия чрезвычайных ситуаций и методические подходы к оценке социально-экономического ущерба*. Учебное пособие, Академия гражданской защиты, Новгородск – 1999.
2. ГУСЯКОВ В. К. *О связи волны цунами с параметрами очага подводного землетрясения* // В кн.: Математические проблемы геофизики. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР. – 1974. – Вып. 5. – С. 118-140.
3. *Единая межведомственная методика оценки ущерба от чрезвычайных ситуаций техногенного, природного и террористического характера, а также классификация и учет чрезвычайных ситуаций*. – М.: МЧС России, 2001.
4. *Отчёт по проекту 4.2. ГНТП «Безопасность» «Разработка научно-методических основ организации и технологии ведения аварийно-спасательных и других неотложных работ при катастрофических затоплениях»*. – М.: ВНИИ ГО ЧС, 1995. – 255с.
5. ПОДЪЯПОЛЬСКИЙ Г. С. *Возбуждение длинной гравитационной волны в океане сейсмическим источником в коре* // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1968. – №1. – С. 7-24.
6. ПОДЪЯПОЛЬСКИЙ Г. С. *О связи волны цунами с порождающим ее погребным источником* // В кн.: *Проблема цунами*. – Москва: Наука. – 1968. – С. 51-62.
7. ТРАХТЕНГЕРЦ Э. А. *Компьютерная поддержка принятия решений*. – М: СИНТЕГ, 1998. – 376 с.



8. ШОКИН Ю. И., ЧУБАРОВ Л. Б., МАРЧУК А. Г., СИМОНОВ К. В. *Вычислительный эксперимент в проблеме цунами* // Новосибирск: Наука, СО, 1989. – 168 с.
9. ЮДИЦКИЙ С. А. *Сценарный подход к моделированию поведения бизнес-систем. Серия «Управление организационными системами»*. – М.: СИНТЕГ, 2001. – 112 с.
10. SCHOLTE J. G. *Over het Verband tussen Zeegolven Microseismen* // Ned. Acad. Wetenschap. – gewone Vergader, Afdel, Natuurk: 1943. – Vol. 52. – P. 669-676.

## **EXPERT FORECAST OF LIFE SUPPORT SYSTEM DAMAGE CONSEQUENCES DUE TO EMERGENCY SITUATIONS**

**Alexey Andreev**, Scientific Production Association "Typhoon", post-graduate student, aka@feerc.obninsk.org.

**Kamaev Dmitry Eduardovich**, Scientific Production Association "Typhoon", Doctor of Technical Science. kda@feerc.obninsk.org.

**Eduard Anatolievich Trahtengerts**, Institute of Control Sciences, Doctor of Technical Science, tracht@ipu.rssi.ru.

*Abstract: This article expounds functional principles and architecture of the computer system for making a forecast of a life support system state in emergency conditions.*

Key words: forecast, life support system, tsunami, computer system, decision support system

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии В.В. Кульбой*

УДК 621.396.4 + 004.716 + 656.61.052  
ББК 32.884.1

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ СТАНДАРТА IEEE 802.16 (WiMAX) ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ КАНАЛА ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ В СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТЬЮ МОРЕПЛАВАНИЯ**

**Шаповалов А. А.<sup>1</sup>**

*(ФГОУ ВПО Морская Государственная Академия  
имени адмирала Ф.Ф. Ушакова, Новороссийск)*

*Рассматриваются аспекты построения канала передачи информации в современных системах безопасности мореплавания (СБМ). Проводится сравнительный анализ существующих решений. Впервые на примере размещенной в порту Новороссийск Системы Управления Движением Судов (СУДС) определены требования к характеристикам оборудования беспроводных сетей IEEE 802.16 (WiMAX), функционирующего в частотном диапазоне 10-66 ГГц и используемого для обеспечения информационного обмена между элементами СБМ.*

Ключевые слова: безопасность мореплавания, системы управления безопасностью мореплавания, СУДС, АИС, ГМССБ, ДГНСС, ЕСКУС, передача информации, беспроводные сети, IEEE 802.16, WiMAX, радиорелейные линии.

### **1. Введение**

Жизнь современного человека неразрывно связана с морем. Оно является транспортной «артерией», по которой осуществляется большая часть мировых перевозок грузов и людей. Еже-

---

<sup>1</sup> Андрей Александрович Шаповалов, аспирант ([andrewsha@gmail.com](mailto:andrewsha@gmail.com)).

дневно в порт заходят сотни судов под различными флагами (так, по данным [10], в 2007 г. российские СУДС в своих районах действия обеспечивали контроль за 216382 судами). Но эта «артерия» является и источником повышенной опасности.

Структура, обеспечивающая безопасность мореплавания (БМ), включает в себя ряд систем, основными из которых являются [4]:

- СУДС, осуществляющая непосредственный контроль и мониторинг движения судов в зоне своей ответственности;
- глобальная морская система связи при бедствии и для обеспечения безопасности (ГМССБ), которая является основной СБМ, обеспечивающей быстрое оповещение спасательных координационных центров (СКЦ) о бедствии и дальнейшее оказание помощи судам, оказавшимся в беде;
- автоматическая идентификационная система (АИС), предназначенная для оперативного обмена статической, динамической и рейсовой информацией между судами и береговыми службами с целью предотвращения столкновений, контроля режима плавания и мониторинга судов;
- система передачи дифференциальных поправок для глобальных навигационных спутниковых систем (ДГНСС), предназначенная для повышения точности определения местоположения судна в обслуживаемом ей районе;
- система гидрометеорологического мониторинга (СГМ), которая обеспечивает мониторинг состояния атмосферных условий и водной среды.

Каждая из перечисленных систем функционирует под управлением человека-оператора, к которому стекается вся необходимая информация как для управления и контроля, так и для принятия решения по безопасности мореплавания. Представление данной информации в различных форматах затрудняет ее восприятие и анализ.

В связи с этим возникает необходимость объединения СБМ, существующих и проектируемых, на информационном уровне с предоставлением информации не только отдельным операторам

систем, но и более широкому кругу лиц, отвечающих за обеспечение безопасности мореплавания. Ставится задача создания структуры, которая бы совместно с отдельными системами вошла в единый информационный комплекс и решила возникшую проблему.

Так в 2003–2004 гг. такие интегрированные системы были введены в эксплуатацию в Австралии на участке между портами Сидней и Мельбурн и в Малаккском проливе.

В августе 2005 г. была сдана в эксплуатацию Международная система мониторинга судов на Балтийском море, организаторами которой являются Россия, Норвегия, Швеция, Дания, Финляндия, Латвия, Литва и Эстония, подписавшие в 2001 г. конвенцию HELCOM.

В России в результате организационных и технических мероприятий по комплексному использованию и информационной интеграции систем создаются региональные системы безопасности мореплавания (РСБМ), которые в перспективе предполагается объединить в Единую систему контроля и управления судоходства (ЕСКУС) «Росморречфлота». К настоящему времени созданы [9, 10]:

- РСБМ восточной части Финского залива, включая СУДС портов Санкт-Петербург, Приморск, Высоцк, Усть-Луга и объекты ГМССБ;

- проведена модернизация СУДС порта Астрахань и Оля, контрольно-корректирующей станции (ККС) Глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) ГЛОНАСС/GPS на подходах к порту Астрахань;

- введена в эксплуатацию базовая станция (БС) морского района А2 ГМССБ и СУДС порта Таганрог;

- проведена модернизация СУДС порта Мурманск (Кольского залива), включая строительство автономного радиотехнического поста (АРТП) на мысе Сеть-Наволоки;

- проведена модернизация СУДС и морского района А1 ГМССБ порта Архангельск;

- создана и введена в эксплуатацию СУДС порта Сочи;

- создана и введена в эксплуатацию СУДС порта Туапсе;
- проведена модернизация СУДС порта Ванино.

Таким образом, актуальность интеграции существующих СБМ в РБСМ и затем в ЕСКУС неоспорима.

Важнейшую роль при этом играет передача информации между элементами ЕСКУС, так как она непосредственным образом обеспечивает формирование содержания различных баз данных (БД) по безопасности мореплавания. Поэтому далее нами в данной статье рассматриваются вопросы организации канала передачи данных между элементами СБМ на примере размещенной в порту Новороссийск СУДС [4].

## **2. Определение требований к каналу передачи информации в системах управления безопасностью мореплавания**

Выбор оптимального способа передачи информации между элементами СБМ зависит от многих факторов, основными из которых являются:

- состав сенсоров и требующаяся для передачи поступающих от них данных полоса пропускания линии;
- расстояние между сенсором и центром управления;
- ландшафт местности;
- уровень развития инфраструктуры связи в регионе и доступность платного сервиса высокоскоростной цифровой связи;
- электромагнитная совместимость проектируемых и действующих систем радиосвязи в регионе;
- возможность применения кабельных каналов;
- сложность получения разрешения на использование частот радиосвязи в регионе размещения системы.

На рис. 1 представлена структурная схема размещенной в порту Новороссийск СУДС. В ее состав входят: Центр СУДС (ЦСУДС); радиоцентры (РЦ) Пенай, Дооб, Геленджик, Южная Озереевка; радиотехнические посты (РТПС) Абрау-Дюрсо и Новороссийск, выполняющие функции ретрансляторов.

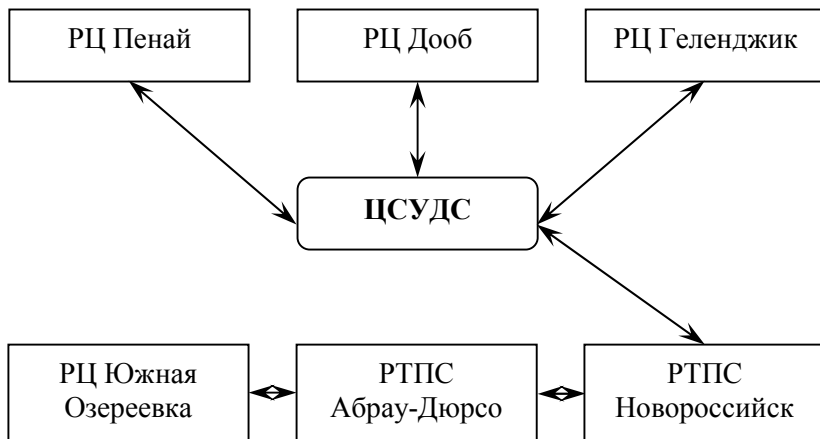


Рис. 1. Структурная схема СУДС порта Новороссийск

С сенсорных постов (СП) в ЦСУДС передается следующая информация [3, 4]:

- радарный образ, формируемый радиолокационными станциями (РЛС);
- данные от базовых станций (БС) АИС;
- видеоданные, поступающие от системы визуального наблюдения;
- данные системы гидрометеорологического мониторинга.

Все сенсоры СУДС, кроме РЛС и системы видеонаблюдения, формируют потоки данных, которые могут быть переданы через один узкополосный канал связи с пропускной способностью 19,2 Кбит/с [4].

Современные РЛС обрабатывают до 16 миллионов квантов отраженного эхосигнала за один оборот антенны, что при скорости вращения 20 оборотов в минуту и восьмиразрядном квантовании создает поток данных более 42 Мбит/с [4]. Оборудование для передачи потока такой интенсивности чрезвычайно дорого, поэтому в СУДС применяются различные способы обработки и сжатия радарного образа. Для выбора оптимального типа канала

связи требуется учитывать способы обработки и сжатия радарных данных, свойства ландшафта и акватории морского района и требования, предъявляемые к конкретной СУДС. Используя сжатие, умеренно очищенный от помех полный радарный образ может быть передан без каких-либо заметных потерь через линию с пропускной способностью около 1 Мбит/с.

Передача *MPEG*-кодированного цветного видеосигнала с качеством, эквивалентным качеству отображения в системе *PAL*, требует полосы пропускания линии связи примерно равной 1,8 Мбит/с [4]. Здесь также возможны различные варианты более сильного сжатия потока цифровых видеоданных за счет снижения количества кадров в секунду, использования черно-белого изображения вместо цветного и применения различных алгоритмов сжатия, например, *MPEG4* или *DivX/XviD*.

Таким образом, каналы передачи информации с учетом установленного на сенсорных постах оборудования должны иметь пропускную способность от 1 до 50 Мбит/с.

Для передачи информации между ЦСУДС и СП можно использовать как арендуемые, так и собственные каналы связи. Характеристики арендуемых каналов приведены в таблице 1. Характеристики собственных каналов связи перечислены в таблице 2.

С учетом рассмотренных нами требований к пропускной способности в СУДС могут использоваться следующие каналы передачи информации:

- цифровые выделенные линии T1/E1;
- оптоволоконный кабель;
- цифровые радиорелейные линии (ЦРРЛ);
- широкополосные радиомосты, полностью или частично соответствующие стандарту *IEEE 802.16* для беспроводных сетей;
- широкополосные радиомосты, основанные на корпоративных стандартах;
- широкополосные радиомосты, соответствующие стандарту *IEEE 802.11* для беспроводных сетей.

Таблица 1. Характеристики арендуемых каналов связи

Канал связи	Характеристики
Коммутируемая или выделенная телефонная линия	Пропускная способность: 2,4-56,0 Кбит/с. Предельная дистанция: не ограничена. Стоимость оборудования: очень низкая. Строительство: не требуется. Арендная плата: низкая.
<i>ISDN</i>	Пропускная способность: 64/128 Кбит/с. Предельная дистанция: любая в зоне действия сервиса. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: не требуется. Арендная плата: средняя.
Цифровая выделенная линия T1/E1	Пропускная способность: от 1,5/2 Мбит/с. Предельная дистанция: любая в зоне действия сервиса. Стоимость оборудования: средняя. Строительство: не требуется. Арендная плата: высокая.

Учитывая климатические и гидрометеорологические условия, наиболее предпочтительным в районе порта Новороссийск является использование беспроводных систем связи [2], таких как РРЛ и вышеперечисленные виды широкополосных радиомостов, так как в этом случае обеспечивается высокая надёжность связи, а приемопередающая аппаратура может располагаться на уже существующих вдоль побережья радиорелейных станциях (РРС), что снижает затраты на капитальное строительство под средства связи.



Таблица 2. Характеристики собственных каналов связи

Канал связи	Характеристики
Собственный кабель с медными жилами	Пропускная способность: 4,8–2048 Кбит/с. Предельная дистанция: 1-20 км (в зависимости от пропускной способности). Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуется прокладка кабеля.
900 МГц широкополосные радиомодемы	Пропускная способность: 1,2-4,8 Кбит/с. Предельная дистанция: 20-25 км. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуются мачты для подъема антенн. Разрешения: во многих странах разрешение на использование такого типа модемов не требуется. Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.
Собственный оптоволоконный кабель	Пропускная способность: 10 Мбит/с. Предельная дистанция: 2 км. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуется прокладка кабеля.
Собственный оптоволоконный кабель	Пропускная способность: 2 Мбит/с. Предельная дистанция: 15 км. Стоимость оборудования: средняя. Строительство: требуется прокладка кабеля.
УКВ/ДМ модемы	Пропускная способность: 1,2-9,6 Кбит/с. Предельная дистанция: 20-25 км. Стоимость оборудования: низкая. Строительство: требуются мачты для подъема антенн. Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот. Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.

<p>Узкополосные <i>Ethernet</i> радиомосты</p>	<p>Пропускная способность: до 2 Мбит/с.                  Предельная дистанция: 20-22 км.                  Стоимость оборудования: средняя.                  Строительство: требуются мачты для подъема антенн.                  Разрешения: во многих странах разрешение на использование такого типа радиомостов не требуется.                  Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.</p>
<p>Цифровые радиорелейные линии (РРЛ)</p>	<p>Пропускная способность: до 34 Мбит/с.                  Предельная дистанция: до 60 км.                  Стоимость оборудования: очень высокая (тем выше, чем больше дистанция и выше пропускная способность радиоинтерфейса).                  Строительство: требуются мачты для подъема антенн.                  Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.                  Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.</p>
<p>Широкополосные радиомосты, соответствующие стандарту <i>IEEE</i> 802.16 (<i>WiMAX</i>) [15, 16, 23, 24]</p>	<p>Пропускная способность: до 134,4 Мбит/с.                  Частотный диапазон: 2-11 ГГц (для соединения базовой станции и потребителя), 10-66 ГГц (для соединения базовых станций).                  Предельная дистанция: до 40 км.                  Стоимость оборудования: средняя.                  Строительство: требуются мачты для подъема антенн.                  Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.                  Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн.</p>

<p>Широкополосные радиомосты, частично соответствующие стандарту <i>IEEE 802.16 (pre-WiMAX)</i> [7]</p>	<p>Пропускная способность: до 54 Мбит/с.          Частотный диапазон: 2,3-6,1 ГГц.          Предельная дистанция: до 80 км.          Стоимость оборудования: средняя.          Строительство: требуются мачты для подъема антенн.          Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.          Ограничения: возможна работа оборудования при отсутствии прямой видимости антенн.</p>
<p>Широкополосные радиомосты, основанные на корпоративных стандартах [17]</p>	<p>Пропускная способность: до 300 Мбит/с.          Частотный диапазон: 2-6 ГГц.          Предельная дистанция: до 200 км.          Стоимость оборудования: средняя.          Строительство: требуются мачты для подъема антенн.          Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.          Ограничения: возможна работа оборудования без прямой видимости антенн на радиолиниях протяженностью до 20 км.</p>
<p>Широкополосные радиомосты, соответствующие стандарту <i>IEEE 802.11 (Wi-Fi)</i> [8, 14, 20, 22]</p>	<p>Пропускная способность: до 108 Мбит/с.          Частотный диапазон: 2,4-2,5 ГГц; 5-6 ГГц.          Предельная дистанция: до 80 км.          Стоимость оборудования: средняя.          Строительство: требуются мачты для подъема антенн.          Разрешения: требуется разрешение на использование полосы частот.          Ограничения: должно выполняться условие прямой видимости антенн при использовании на радиолиниях протяженностью более 20 км.</p>

В настоящее время связь между СП и ЦСУДС в порту Новороссийск организована с использованием цифровых РРС *Nokia FlexiHopper*, обеспечивающих пропускную способность до 34 Мбит/с, и аналоговых РРС *Ericsson MiniLink*, обеспечи-

вающих пропускную способность до 2 Мбит/с.

Однако широкополосные мосты на основе беспроводных сетей *WiMAX* имеют ряд преимуществ перед используемыми в настоящее время в СУДС порта Новороссийск РРЛ:

- более высокую пропускную способность (до 134,4 Мбит/с при ширине канала 28 МГц и модуляции 64-QAM для оборудования, работающего в частотном диапазоне 10-66 ГГц [16]);

- значительно более низкую цену. Так, например, комплект *WiMAX*-оборудования *Nateks Multilink W* [21], используемый для организации канала связи с топологией «точка – точка» на радиотрассах протяженностью до 40 км и обеспечивающий пропускную способность до 36 Мбит/с, согласно [1], стоит 313568 руб., а аналогичный ему по характеристикам комплект РРЛ-оборудования *Nateks Microlink* [18] стоит 2562828 руб.

Поэтому далее мы рассмотрим возможность применения широкополосных радиомостов, соответствующих стандарту *IEEE 802.16* и функционирующих в частотном диапазоне 10-66 ГГц, для организации информационного обмена между элементами СБМ.

### **3. Определение требований к приемопередающему оборудованию**

Как известно, каждая система передачи данных состоит из трех основных частей: передатчика, приемника и соединяющей линии. В радиолинии роль промежуточного звена выполняет среда, которая является звеном, практически не поддающимся управлению. Влияние среды на распространение радиоволн (РРВ) проявляется в изменении амплитуды поля волны, скорости и направления распространения волны. Поэтому при исследовании РРВ возникает задача: расчет энергетических параметров радиолинии (выбор мощности передающего устройства и определение напряженности на входе приемного устройства).

В рамках данной статьи рассматриваются линии связи, обеспечивающие передачу информации между ЦСУДС порта

Новороссийск и СП. В этом случае приемная и передающая антенны расположены на расстоянии прямой видимости.

Исходные данные для проведения расчета необходимой мощности передатчика приведены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3. Требуемые характеристики WiMAX-оборудования

Характеристика	Значение
Частотный диапазон в режиме «точка – точка» для соединения БС, ГГц	10-66
Рабочая частота, ГГц	13
Коэффициент усиления передающей антенны, дБи	38,0
Сопротивление антенны, Ом	50,0
Чувствительность приемника по мощности, дБм	-120,0
Длина антенны, м	0,6

Для определения мощности передатчика необходимо определить напряженность электрического поля в точке приема по формуле [11]:

$$(1) \quad E_{00} = \frac{\sqrt{60 \cdot P \cdot G}}{r},$$

где  $E_{00}$  – напряженность электрического поля в месте приема, мВ/м;  $P$  – мощность передатчика, кВт;  $G$  – коэффициент усиления передающей антенны;  $r$  – расстояние между точками приема и передачи, км.

Минимальная напряженность электрического поля, необходимая для приема, определяется по формуле [13]:

$$(2) \quad E_{\min} = \frac{U_{\min}}{l_0},$$

где  $U_{\min}$  – минимальное значение ЭДС в антенне, необходимое для приема, В;  $l_0$  – действующая длина антенны.

Минимальное значение ЭДС в антенне, необходимое для приема, определяется по формуле [13]:

$$(3) \quad U_{\min} = \sqrt{P \cdot R},$$

где  $P$  – чувствительность приемника, Вт;  $R$  – сопротивление

антенны, Ом.

Таблица 4. Параметры радиотрасс

Радиотрасса	Протяженность, км	Тип подстилающей поверхности	Высота подъема антенн, м	Параметры препятствия
РЦ Пенай – ЦСУДС	12,3	Вода	35-56	–
РЦ Дооб – ЦСУДС	17,8	Вода	198-56	–
РЦ Геленджик – ЦСУДС	18,3	Вода	319-56	–
РЦ Ю. Озеревка – РТПС Абрау-Дюрсо	6,3	Пересеченная местность	125-81	–
РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск	13,9	Пересеченная местность	81-504	Относительная координата: 0,612. Просвет: 6,76 м
РТПС Новороссийск – ЦСУДС	14,0	Пересеченная местность	504-56	–

Действующая длина антенны определяется по формуле [13]:

$$(4) \quad l_a = \frac{\lambda}{2 \cdot \pi} \cdot \operatorname{tg} \left( \frac{\pi \cdot l}{\lambda} \right),$$

где  $\lambda$  – длина волны, м;  $l$  – длина антенны, м.

Длина волны определяется по формуле:

$$(5) \quad \lambda = \frac{c}{f},$$

где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света;  $f$  – частота, Гц.

Определим по формуле (5) длину волны:  $\lambda = 0,023$  м.

Подставляя необходимые исходные данные в формулу (4), определим действующую длину антенны:  $l_0 = 0,017$  м.

Минимальное значение ЭДС в антенне, необходимое для приема, определяется по формуле (3):  $U_{\min} = 7,07 \cdot 10^{-6}$  В.

Тогда минимальная напряженность электрического поля, необходимая для приема, определится по формуле (2):  $E_{\min} = 0,409$  мВ/м.

Таким образом, минимальная необходимая мощность передатчика в свободном пространстве в соответствии с формулой (1) определится как:

$$(6) \quad P_0 = \frac{E_{\min}^2 \cdot r^2}{60 \cdot G},$$

где  $P_0$  – необходимая мощность передатчика, кВт;  $E_{\min}$  – напряженность электрического поля в месте приема, мВ/м.

Подставляя полученные данные в формулу (6), определим необходимую мощность передатчика в свободном пространстве для каждой радиолинии. Результаты расчета приведены в таблице 5.

В реальных радиолиниях передачи данных условия распространения радиоволн существенно отличаются от условий распространения в свободном пространстве из-за влияния атмосферы Земли, гидрометеорологических факторов и земной поверхности. Для учета этого вводится множитель ослабления  $V$ , который зависит от протяженности линии связи, длины волны, высот подъема антенн, рельефа местности и т.д. Его значение можно определить как теоретически, так и экспериментально путем измерения мощности сигнала на входе приемника. Из-за сложности и многообразия различных условий распространения радиоволн практически невозможно создать строгие методы расчета множителя ослабления.

Таблица 5. Необходимая мощность передатчика в свободном пространстве

Радиотрасса	Необходимая мощность, мВт
РЦ Пенай – ЦСУДС	66,92
РЦ Дооб – ЦСУДС	140,16
РЦ Геленджик – ЦСУДС	144,92
РЦ Ю. Озереевка – РТПС Абрау-Дюрсо	17,56
РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск	85,47
РТПС Новороссийск – ЦСУДС	86,70

На открытых интервалах линий передачи данных множитель ослабления имеет интерференционный характер, так как в точку приема кроме прямой волны могут приходиться одна или несколько волн, отраженных от земной поверхности.

Интерференционный множитель ослабления  $V$  рассчитывается по формуле [12]:

$$(7) \quad V = \sqrt{1 + \Phi^2 + 2 \cdot \Phi \cdot \cos\left(\frac{4 \cdot \pi \cdot h_1 \cdot h_2}{\lambda \cdot r} + \theta\right)},$$

где  $\Phi$  – модуль коэффициента отражения;  $h_1$  – высота подъема передающей антенны, м;  $h_2$  – высота подъема приемной антенны, м;  $r$  – расстояние между точками приема и передачи, м;  $\theta$  – фаза коэффициента отражения, град.

Для расчета интерференционного множителя ослабления необходимо определить модуль коэффициента отражения  $\Phi$  и его фазу  $\theta$ . Метод их расчета подробно изложен в [12]. Для определения коэффициента отражения и его фазы необходимы следующие данные:

- диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  подстилающей поверхности;



- угол скольжения  $\Delta$ , определяемый графическим путем и зависящий от расстояния между антеннами и от высоты подъема антенн над уровнем моря.

Модуль коэффициента отражения и его фаза определяются по номограммам «Кривые модулей коэффициентов отражения» и «Кривые аргументов коэффициентов отражения», приведенным в [12].

При распространении радиоволн на большие расстояния значение фазы коэффициента отражения стремится к  $180^\circ$  ( $\theta \rightarrow 180^\circ$ ) [13] и из-за сложности вычисления коэффициентов отражения к расчету принимают их усредненные значения, выбираемые из таблицы «Усредненные значения коэффициентов отражения» [5].

Подставляя в формулу (7) соответствующие значения модуля коэффициента отражения (согласно [5]  $\Phi = 0,8$  для воды и  $\Phi = 0,2$  для пересеченной лесистой местности), фазы коэффициента отражения  $\theta = 180^\circ$ , длины волны, определенное по формуле (5), высоты подъема антенн и расстояния между антеннами, рассчитаем интерференционные множители ослабления для радиотрасс в зоне ответственности СУДС порта Новороссийск:  $V_{СП} = 1,02$ ,  $V_{СД} = 1,08$ ,  $V_{СГ} = 1,14$ ,  $V_{ОА} = 0,97$ ,  $V_{НС} = 0,94$ .

Так как на радиотрассе РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск расположено препятствие (гора), то необходимо определить тип данной трассы. Для этого рассчитаем по формуле [5] просвет на трассе, при котором напряженность поля в точке приема равна напряженности поля свободного пространства:

$$(8) \quad H_0 = \sqrt{\frac{1}{3} \cdot R_0 \cdot \lambda \cdot k \cdot (1 - k)},$$

где  $k$  – относительная координата точки, определяющей просвет на трассе;  $R_0$  – расстояние между приемной и передающей антеннами, м.

Подставляя в формулу (8) соответствующие значения из таблиц 3 и 4, получим  $H_0 = 5,04$  м.

Так как полученное значение  $H_0$  удовлетворяет условию  $H > H_0$ , то согласно [13] данную радиотрассу можно считать

открытой. В этом случае необходимо дополнительно вычислить угол скольжения по формуле [5]:

$$(9) \quad \theta' = \frac{H(g)}{2 \cdot R_0 \cdot k \cdot (1-k)},$$

где  $H(g)$  – просвет на трассе с учетом рефракции, м;  $R_0$  – расстояние между приемной и передающей антеннами, м;  $k$  – относительная координата препятствия.

Просвет на трассе с учетом рефракции определяется по формуле [5]:

$$(10) \quad H(g) = H + \Delta H(g) - \delta H(g),$$

где  $H$  – просвет при отсутствии рефракции, м;  $\Delta H(g) - \delta H(g)$  – приращение просвета при изменении  $g$  ( $\delta H(g) = 0$  на открытых и полуоткрытых интервалах [5]), определяемое по формуле [5]:

$$(11) \quad \Delta H(g) - \delta H(g) = -\frac{R_0^2 \cdot g \cdot k \cdot (1-k)}{4} - \delta H(g).$$

Преобразуем формулу (10):

$$(12) \quad H(g) = H - \frac{R_0^2 \cdot g \cdot k \cdot (1-k)}{4}.$$

Рассчитаем по формуле (12) значение просвета на трассе с учетом рефракции:  $H(g) = 8,14$  м.

Подставляя в формулу (9) полученное по формуле (12) значение  $H(g)$ , определим значение угла скольжения:  $\theta' = 1,23 \cdot 10^{-3}$  рад.

При малых углах  $\theta'$  коэффициент ослабления на радиотрассах с одним препятствием определяется по формуле [5]:

$$(13) \quad V = \sqrt{1 + \Phi^2 - 2 \cdot \Phi \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot p(g)}{3}\right)},$$

где  $p(g)$  – относительный просвет на трассе при заданном значении  $g$ , определяемый по формуле [5]:

$$(14) \quad p(g) = \frac{H(g)}{H_0}.$$

Подставляя в формулу (14) значения  $H(g)$  и  $H_0$ , получим искомое значение:  $p(g) = 1,61$ .

Определим по формуле (13) коэффициент ослабления на радиотрассе РТПС Абрау-Дюрсо – РТПС Новороссийск:  $V_{АН} = 0,94$ .

Необходимая мощность передатчика с учетом интерференционного множителя ослабления определяется по формуле [11]:

$$(15) P = \frac{P_0}{V^2}.$$

Подставляя в формулу (15) полученные значения мощности передатчика в свободном пространстве и соответствующие им множители ослабления, получим необходимую мощность передатчика при распространении радиоволн в реальных условиях при ослаблении за счет влияния подстилающей поверхности:  $P_{СП} = 64,32$  мВт,  $P_{СД} = 120,16$  мВт,  $P_{СГ} = 111,05$  мВт,  $P_{ОА} = 19,87$  мВт,  $P_{АН} = 96,73$  мВт,  $P_{СГ} = 111,05$  мВт.

Величина множителя ослабления при поглощении радиосигнала гидрометеорами в децибелах определяется по формуле [5]:

$$(16) V = -\gamma \cdot R_{эф},$$

где  $\gamma$  – коэффициент ослабления, дБ/км;  $R_{эф}$  – эффективная длина трассы, км, на которой коэффициент ослабления примерно постоянен и равен  $\gamma$ .

Расчет ослабления сигнала в дожде осуществляется по методике, изложенной в [6].

Коэффициент ослабления в дожде определяется по формуле [6]:

(17)  $\gamma = \beta \cdot J^\alpha$ , где  $J$  – интенсивность осадков, мм/час;  $\alpha$  и  $\beta$  – коэффициенты, определяемые по формулам [6]:

$$(18) \alpha = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot \ln^{-1}(f) + \alpha_2 \cdot \ln^{-3}(f) + \alpha_3 \cdot \ln^{-5}(f),$$

где  $\alpha_0 = -2,125$ ,  $\alpha_1 = 16,48$ ,  $\alpha_2 = -87,9$ ,  $\alpha_3 = 232,2$ ;  $f$  – частота, ГГц.

$$(19) \beta = e^{\beta_0 + \beta_1 \cdot \ln(f) + \beta_2 \cdot \ln^2(f)},$$

где  $\beta_0 = -12,39$ ,  $\beta_1 = 4,1$ ,  $\beta_2 = -0,288$ .

Подставляя соответствующие значения коэффициентов и значение частоты в формулы (18) и (19), определим значение

коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ :  $\alpha = 1,183$  и  $\beta = 0,023$ .

Согласно [2] средняя интенсивность дождя в районе Новороссийска составляет 7 мм/ч. Подставляя ее значение и ранее полученные значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$  в формулу (17), определим значение коэффициента ослабления:  $\gamma = 0,231$ .

Эффективная протяженность дождевого образования в километрах определяется по эмпирической формуле [6]:

$$(20) R_{\gamma\delta} = \frac{R_0}{1 + \frac{R_0}{35 \cdot \exp(-0,015 \cdot J_{0,01})}},$$

где  $J_{0,01}$  – интенсивность дождя, который идет в данной местности в течение 0,01% времени, мм/ч;  $R_0$  – длина радиотрассы, км.

Величина  $J_{0,01}$  определяется по номограмме «Статистические распределения среднeminутных значений интенсивности дождей» [5]:  $J_{0,01} = 72$  мм/ч.

Подставляя в формулу (20) значение  $J_{0,01}$  и соответствующие длины радиотрасс из таблицы 4, определим эффективные длины радиотрасс:  $R_{\text{ЭФ-СП}} = 6,05$  км,  $R_{\text{ЭФ-СД}} = 7,13$  км,  $R_{\text{ЭФ-СГ}} = 7,21$  км,  $R_{\text{ЭФ-ОА}} = 4,12$  км,  $R_{\text{ЭФ-АН}} = 6,41$  км,  $R_{\text{ЭФ-СП}} = 6,43$  км.

Подставляя в формулу (16) полученные значения  $R_{\text{ЭФ}}$  и  $\gamma$ , рассчитаем множитель ослабления в дожде:  $V_{\text{СП}} = -1,39$  дБ,  $V_{\text{СД}} = -1,65$  дБ,  $V_{\text{СГ}} = -1,67$  дБ,  $V_{\text{ОА}} = -0,95$  дБ,  $V_{\text{АН}} = -1,48$  дБ,  $V_{\text{НС}} = -1,49$  дБ.

Коэффициент ослабления в сухом снеге и граде значительно меньше, чем в дожде той же интенсивности, из-за меньшей величины диэлектрической проницаемости твердых частиц (для воды  $\epsilon \approx 80$ , для льда и снега  $\epsilon = 2 \div 3$ ). Его значение определяется из таблицы «Сравнительная оценка коэффициентов ослабления для сухого снега и дождя» [5]. Согласно [5] на частотах менее 50 ГГц влиянием сухого снега можно пренебречь, а коэффициент ослабления в мокром снеге равен коэффициенту ослабления в дожде той же интенсивности.

Коэффициент ослабления в туманах определяется по формуле [5]:

$$(21) \gamma = k_e \cdot M,$$

где  $M$  – количество жидкости в единице объема (водность),  $\text{г/м}^3$ , выбираемое из таблицы «Характеристики облаков и туманов» [5];  $k_e$  – коэффициент ослабления на единицу водности,  $\text{дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ , определяемый по номограмме «Определение коэффициента ослабления в туманах и облаках» [5].

Определим значение водности:

- а) для капельно-жидких туманов:  $M = 1 \text{ г/м}^3$ ;
- б) для смешанных туманов:  $M = 0,3 \text{ г/м}^3$ .

Определим коэффициент ослабления на единицу водности:

1. Для капельно-жидких туманов:
  - а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,11 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ ;
  - б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,09 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ .
2. Для смешанных туманов:
  - а) при температуре  $0^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,16 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ ;
  - б) при температуре  $-8^\circ\text{C}$ :  $k_e = 0,2 \text{ дБ}\cdot\text{м}^3/\text{км}\cdot\text{г}$ .

Горизонтальная протяженность туманов достигает нескольких сотен километров. Поэтому, будем считать, что для туманов  $R_{\text{эф}} \geq R_0$ .

Подставляя в формулу (21) полученные значения водности и коэффициента ослабления на единицу водности, определим коэффициент ослабления:

1. Для капельно-жидких туманов:
  - а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,11 \text{ дБ/км}$ ;
  - б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,09 \text{ дБ/км}$ .
2. Для смешанных туманов:
  - а) при температуре  $0^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,048 \text{ дБ/км}$ ;
  - б) при температуре  $-8^\circ\text{C}$ :  $\gamma = 0,06 \text{ дБ/км}$ .

Подставляя в формулу (16) полученные значения коэффициента ослабления, определим множитель ослабления:

1. В капельно-жидких туманах:
  - а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :  
 $V_{\text{СП}} = -1,35 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СД}} = -1,96 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СГ}} = -2,01 \text{ дБ}$ ,  
 $V_{\text{ОА}} = -0,69 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{АН}} = -1,53 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{НС}} = -1,54 \text{ дБ}$ .
  - б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :  
 $V_{\text{СП}} = -1,11 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СД}} = -1,60 \text{ дБ}$ ,  $V_{\text{СГ}} = -1,65 \text{ дБ}$ ,

$$V_{OA} = -0,57 \text{ дБ}, V_{AH} = -1,25 \text{ дБ}, V_{HC} = -1,26 \text{ дБ}.$$

2. В смешанных туманах:

а) при температуре  $0^\circ\text{C}$ :

$$V_{СП} = -0,59 \text{ дБ}, V_{СД} = -0,85 \text{ дБ}, V_{СГ} = -0,88 \text{ дБ},$$

$$V_{OA} = -0,30 \text{ дБ}, V_{AH} = -0,66 \text{ дБ}, V_{HC} = -0,67 \text{ дБ}.$$

б) при температуре  $-8^\circ\text{C}$ :

$$V_{СП} = -0,74 \text{ дБ}, V_{СД} = -1,07 \text{ дБ}, V_{СГ} = -1,09 \text{ дБ},$$

$$V_{OA} = -0,38 \text{ дБ}, V_{AH} = -0,83 \text{ дБ}, V_{HC} = -0,84 \text{ дБ}.$$

Перевод значений множителей ослабления из логарифмической (в дБ) в линейную систему исчисления осуществляется на основании формулы [5]:

$$(22) V_{дБ} = 20 \cdot \lg V,$$

где  $V_{дБ}$  – значение множителя ослабления, дБ.

Из газов, входящих в состав атмосферы, ослабление вызывают кислород и водяной пар. Оно обусловлено взаимодействием падающего поля волны и молекул газов, обладающих электрическим и магнитным моментами, и достигает максимума при совпадении частоты воздействующего поля с собственными частотами колебаний молекул. Экспериментальные данные, приведенные в [5], показывают, что ослаблением сигнала кислородом и водяным паром можно пренебречь на частотах, меньших 15 ГГц.

Подставляя в формулу (15) значения мощности передатчика при распространении радиоволн в реальных условиях и предварительно переведенные по формуле (22) значения коэффициентов ослабления, определим необходимую мощность передатчика при поглощении сигнала:

1. В дожде и мокром снеге:

$$P_{СП} = 88,58 \text{ мВт}, P_{СД} = 175,69 \text{ мВт}, P_{СГ} = 163,12 \text{ мВт},$$

$$P_{OA} = 24,73 \text{ мВт}, P_{AH} = 136,01 \text{ мВт}, P_{HC} = 138,27 \text{ мВт}.$$

2. В капельно-жидких туманах:

а) при температуре  $10^\circ\text{C}$ :

$$P_{СП} = 87,77 \text{ мВт}, P_{СД} = 188,69 \text{ мВт}, P_{СГ} = 176,41 \text{ мВт},$$

$$P_{OA} = 23,29 \text{ мВт}, P_{AH} = 137,58 \text{ мВт}, P_{HC} = 139,88 \text{ мВт}.$$

б) при температуре  $20^\circ\text{C}$ :

$$P_{СП} = 83,05 \text{ мВт}, P_{СД} = 173,68 \text{ мВт}, P_{СГ} = 162,37 \text{ мВт},$$

$$P_{ОА} = 22,66 \text{ мВт}, P_{АН} = 128,99 \text{ мВт}, P_{СП} = 131,15 \text{ мВт}.$$

3. В смешанных туманах:

а) при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ :

$$P_{СП} = 73,68 \text{ мВт}, P_{СД} = 146,14 \text{ мВт}, P_{СГ} = 135,99 \text{ мВт},$$

$$P_{ОА} = 21,29 \text{ мВт}, P_{АН} = 112,61 \text{ мВт}, P_{СП} = 114,49 \text{ мВт}.$$

б) при температуре  $-8^{\circ}\text{C}$ :

$$P_{СП} = 76,27 \text{ мВт}, P_{СД} = 153,73 \text{ мВт}, P_{СГ} = 142,73 \text{ мВт},$$

$$P_{ОА} = 21,69 \text{ мВт}, P_{АН} = 117,10 \text{ мВт}, P_{СП} = 119,06 \text{ мВт}.$$

Таким образом, для организации связи между элементами СУДС может быть использовано *WiMAX*-оборудование, мощность которого соответствует определенным нами требованиям и технические характеристики которого приведены в таблице 3. При этом будет обеспечиваться одинаковое качество работы оборудования в различных условиях РРВ.

Пропускная способность, обеспечиваемая *WiMAX*-радиоинтерфейсом, зависит в первую очередь от ширины радиоканала и типа используемой модуляции.

Зависимость пропускной способности *WiMAX*-канала от его ширины и типа модуляции приведена в таблице 6.

Таблица 6. Зависимость пропускной способности *WiMAX*-интерфейса от ширины радиоканала и типа модуляции

Ширина канала, МГц	20	25	28
Тип модуляции			
QPSK	32 Мбит/с	40 Мбит/с	44,8 Мбит/с
16-QAM	64 Мбит/с	80 Мбит/с	89,6 Мбит/с
64-QAM	96 Мбит/с	120 Мбит/с	134,4 Мбит/с

Соответствующее стандарту [16] оборудование варьирует тип используемой модуляции в зависимости от отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе приемного устройства. Зависимость используемого типа модуляции от отношения С/Ш на входе

приемного устройства приведена в таблице 7.

Таблица 7. Зависимость типа модуляции от отношения сигнал/шум на входе приемного устройства

Тип модуляции	Скорость кодирования	Уровень сигнал/шум, дБ
BPSK	1/2	6,4
QPSK	1/2	9,4
QPSK	3/4	11,2
16-QAM	1/2	16,4
16-QAM	3/4	18,2
64-QAM	1/2	22,7
64-QAM	3/4	24,4

Отношение сигнал/шум на входе приемника может быть определено исходя из формулы необходимой чувствительности приемного устройства в дБ [16]:

$$(23) R_{SS} = -102 + SNR_{Rx} + \lg(F_S),$$

где  $SNR_{Rx}$  – чувствительность приемного устройства, дБ;  $F_S$  – *sampling frequency*.

Значение *sampling frequency* определяется по формуле [16]:

$$(24) F_S = 8000 \cdot \text{floor}\left(\frac{n \cdot BW}{8000}\right),$$

где  $BW$  – ширина канала, Гц;  $n$  – коэффициент, принимающий значение 144/125 для каналов, ширина которых кратна 1,25; 57/50 для каналов, ширина которых кратна 2,0; 8/7 для каналов другой ширины.

Модифицируя формулу (23) и подставляя в нее необходимые исходные данные, вычислим отношение С/Ш в дБ на входе приемного устройства для ширины радиоканала 20, 25 и 28 МГц. Полученные результаты приведены в таблице 8.



Таблица 8. Отношение С/Ш на входе приемного устройства

Ширина канала, МГц	20	25	28
Радиотрасса			
РЦ Пенай – ЦСУДС	20,66	19,65	19,19
РЦ Дооб – ЦСУДС	20,66	19,65	19,19
РЦ Геленджик – ЦСУДС	20,56	19,55	19,09
РЦ Ю. Озереевка – РТПС Абрау- Дюрсо	20,66	19,65	19,19
РТПС Абрау- Дюрсо – РТПС Новороссийск	20,66	19,65	19,19
РТПС Новорос- сийск – ЦСУДС	20,66	19,65	19,19

Таким образом, на основании полученных результатов для каждой из радиотрасс будет обеспечена следующая пропускная способность: 64 Мбит/с при ширине канала 20 МГц, 80 Мбит/с при ширине канала 25 МГц и 89,6 Мбит/с при ширине канала 28 МГц.

#### 4. Заключение

В статье рассмотрены аспекты построения канала передачи информации в современных СБМ и определены требования к нему. Проведен сравнительный анализ существующих решений. На примере размещенной в порту Новороссийск СУДС впервые показана возможность использования беспроводных сетей, функционирующих в частотном диапазоне 10-66 ГГц и соответствующих стандарту *IEEE 802.16 (WiMAX)*, для обеспечения информационного обмена между элементами СБМ.

## Литература

1. ГК НАТЕКС: продажа телекоммуникационного оборудования [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/sales/>
2. ДЕМЬЯНОВ В. В., ПОПОВ В. В. *Научное осмысление опыта создания информационной сети ГМССБ на Юге России*. – Новороссийск – Ростов-на-Дону: Государственная Морская Академия – Академия транспорта РФ, 1999. – 624 с.
3. ДОЛМАТОВ Б. М. *Системный подход к созданию больших информационных комплексов безопасности мореплавания (на примере систем безопасности мореплавания в регионе порта Новороссийск)*: дис. канд. техн. наук. – Новороссийск, 2002. – 174 с.
4. ДОЛМАТОВ Б. М., ПОПОВ В. В. *Научные аспекты создания автоматизированных информационно-идентификационных систем безопасности мореплавания в портах Южного бассейна России*. – М.: РосКонсульт, 2001. – 496 с.
5. КАМЕНСКИЙ Н. Н., МОДЕЛЬ А. М., НАДЕНЕНКО Б. С. и др. *Справочник по радиорелейной связи*. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с.
6. ЛОБАЧ В. С. *Основы проектирования цифровых радиорелейных линий* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ctt-group.ru/documents/r11/index.html>
7. НПО Рапира – беспроводные сети wi-fi, ieee 802.16. *Телекоммуникационное оборудование Wimax. Беспроводная технология Wimax* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nporapira.ru/index.php?id=20>
8. НПО Рапира: *каталог оборудования | Точка-точка (радиомост)* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nporapira.ru/catalog/equip2>
9. ПАРФЕНОВ Ю. *Для безопасности мореплавания* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.connect.ru/article.asp?id=7593>
10. ПАРФЕНОВ Ю. *Развитие систем обеспечения безопасности мореплавания* [Электронный ресурс] // Морские вести

- России: сайт. – URL: <http://www.morvesti.ru/anons-file/index.php?news=2669> (дата обращения 17.10.2008).
11. ЧЕРЕНКОВА Е. Л., ЧЕРНЫШЕВ О. В. *Распространение радиоволн*: учеб. для ВУЗов связи. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
  12. ЧЕРНЫЙ Ф. Б. *Распространение радиоволн*. – М.: Советское радио, 1972. – 464 с.
  13. ЧЕРНЫШОВ В. П., ШЕЙНМАН Д. И. *Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства*: учеб. – М.: Радио и связь, 1989. – 238 с.
  14. *Cisco Aironet 1400 Series Wireless Bridge [Cisco Aironet 1400 Series]* – Cisco Systems [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5679/ps5279/ps5285/product\\_data\\_sheet09186a008018495c.html](http://www.cisco.com/en/US/prod/collateral/wireless/ps5679/ps5279/ps5285/product_data_sheet09186a008018495c.html)
  15. *IEEE 802.16 – Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE\\_802.16](http://en.wikipedia.org/wiki/IEEE_802.16)
  16. *IEEE Std. 802.16-2004: Standard for local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Systems*. – New York: IEEE, 2004. – 857 pp.
  17. *Motorola Point-to-Point Wireless Ethernet Bridges* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.motorola.com/business/v/index.jsp?vgnextoid=773862ba88de6110VgnVCM1000008406b00aRCRD&vgnnextnoice=1>
  18. *Nateks Microlink. ГК Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=61>
  19. *Nateks Multilink 3. ГК Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=155>
  20. *Nateks Multilink L PtP. Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа:

- <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=209>
21. *Nateks Multilink W. ГК Натекс: Телекоммуникационное оборудование. Каталог* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.nateks.ru/products/index.php?link=prod&id=156>
  22. *smartbridges* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.smartbridges.ru/box/8>
  23. *WiMAX – Википедия* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/wiki/WiMAX>
  24. *WiMAX – Wikipedia, the Free Encyclopedia* [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://en.wikipedia.org/wiki/Wimax>

## **USING IEEE 802.16 (WiMAX) WIRELESS NETWORKS TO BUILD DATA TRANSMISSION CHANNEL IN SAFETY OF SHIPPING MANAGEMENT SYSTEMS**

**Andrey Shapovalov**, Admiral Ushakov Maritime State Academy, Novorossiysk, graduate student ([andrewsha@gmail.com](mailto:andrewsha@gmail.com)).

*Abstract: Aspects of building of data transmission channel in modern safety of shipping management systems are considered. Comparative analysis of current solutions is carried out. Requirements to the characteristics of the IEEE 802.16 (WiMAX) wireless equipment working in 10-66 GHz frequency band and to be used to ensure data transmission between elements of safety of shipping systems were determined on example of Novorossiysk Vessel Traffic System (VTS) for the first time.*

Keywords: safety of shipping, safety of shipping management systems, VTS, AIS, GMDSS, DGNS, VTMS, data transmission, wireless networks, IEEE 802.16, WiMAX, radio relay lines.

*Статья представлена к публикации членом редакционной коллегии Р.Т. Сиразетдиновым*