# SCCS

# Системы управления, связи и безопасности

# Systems of Control, Communication and Security

№1 2016

ISSN 2410-9916

http://sccs.intelgr.com

ISSN 2410-9916

ООО «Корпорация «Интел Групп»

# Системы управления, связи и безопасности

Периодическое электронное издание
комплексного распространения

Научный журнал

Издается с апреля 2015 года
Выходит один раз в квартал

№ 1
I квартал 2016 г.

© ООО «Корпорация «Интел Групп», 2016

Журнал «Системы управления, связи и безопасности» является научным рецензируемым периодическим электронным изданием. Цель журнала – максимально полное, оперативное и открытое информирование научной общественности об основных результатах научно-исследовательских работ в области теории управления, теории связи, теории безопасности, а также о новых тенденциях развития технологий соответствующих прикладных областей.

Периодичность выхода журнала – четыре номера в год.

Журнал «Системы управления, связи и безопасности» публикует только статьи, которые соответствуют основным тематическим разделам журнала:

1. Анализ новых технологий и перспектив развития систем управления, связи и безопасности.
2. Системы управления.
3. Интеллектуальные информационные системы.
4. Робототехнические системы.
5. Вычислительные системы.
6. Информационные процессы и технологии. Сбор, хранение и обработка информации.
7. Информационная безопасность.
8. Передача, прием и обработка сигналов. Радиоэлектронный мониторинг.
9. Системы связи и телекоммуникации.
10. Системы обеспечения безопасности.
11. Моделирование сложных организационно-технических систем.
12. Объекты интеллектуальной собственности и инновационные технологии в области управления, связи и безопасности.

Публикация в журнале является научным печатным трудом.

Журнал доступен по адресу http://sccs.intelgr.com.

**Содержание**

**Догадина Е.П., Холкина Н.Е.** МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ С УЧЕТОМ ИХ ОСОБЕННОСТЕЙ 1
**Волков В.Г.** КВАНТОВО-КАСКАДНЫЕ ЛАЗЕРЫ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ В СИСТЕМАХ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И СВЯЗИ 10
**Ушанев К.В., Макаренко С.И.** ПОКАЗАТЕЛИ СВОЕВРЕМЕННОСТИ ОБСЛУЖИВАНИЯ ТРАФИКА В СИСТЕМЕ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ PA/M/1 НА ОСНОВЕ АППРОКСИМАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ 42
**Федулов А.С., Борисов В.В.** МОДЕЛИ СИСТЕМНОЙ ДИНАМИКИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКИХ РЕЛЯЦИОННЫХ КОГНИТИВНЫХ КАРТ 66
**Макаренко С.И., Чаленко Н.Н., Крылов А.Г.** СЕТИ СЛЕДУЮЩЕГО ПОКОЛЕНИЯ NGN 81
**Антамошкин А.Н., Масич И.С.** ПОИСКОВЫЕ АЛГОРИТМЫ УСЛОВНОЙ ПСЕВДОБУЛЕВОЙ ОПТИМИЗАЦИИ 103
**Кузовкова Т.А., Женчур М.А., Кузовков А.Д.** МЕТОДИЧЕСКИЙ АППАРАТ КОМПЛЕКСНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ ИНФОКОММУНИКАЦИЙ 146
**Осовецкий Л.Г.** ГЕНОМ ИНФОРМАТИЗАЦИИ И КОРПОРАТИВНАЯ ИММУНОЛОГИЯ ИНТЕРНЕТА 191
**Рябцев В.Г., Уткина Т.Ю.** ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ 207
**Левин В.И., Немкова Е.А.** ИНТЕРВАЛЬНАЯ ЗАДАЧА ОПТИМИЗАЦИИ СЕБЕСТОИМОСТИ И ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОДУКЦИИ 240
**Жидко Е.А.** ЛОГИКО-ВЕРОЯТНОСТНО-ИНФОРМАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ФОРМИРОВАНИЮ ЕДИНОГО АЛГОРИТМА ИССЛЕДОВАНИЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЗАЩИТЫ 262
**Макаренко С.И.** ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ВНЕДРЕНИЯ НОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ 278
**Turko S., Safonov I.** SHARPENING OF VIDEO FRAMES FOR IMPROVEMENT OF FEATURE POINTS DETECTION 288
**Семенов С.С., Смолеха В.П., Плут М.Н., Коморников П.М., Смолеха А.В.** ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО РАСПОЛОЖЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СТАНДАРТА TETRA ДЛЯ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ КООРДИНАТНО-ВРЕМЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ О СРЕДСТВАХ СВЯЗИ 300
**Аминев Д.А., Охломенко И.В., Никитенко М.В., Сачкова Н.А., Гусева П.А.** ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИМПОРТОЗАМЕЩЕНИЯ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ СЕМЕЙСТВА SAM D20 КОМПАНИИ ATMEL ОТЕЧЕСТВЕННЫМИ АНАЛОГАМИ 310
**Парамонов И.Ю.** МОДЕЛЬ УЧЕТА ЦЕННОСТИ И СТАРЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ОЦЕНИВАНИИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ 328
**Левин В.И.** ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕРВАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ МЕТОДАМИ ИНТЕРВАЛЬНО-ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ИСЧИСЛЕНИЯ 335

**Архив выпусков журнала** доступен по адресу http://sccs.intelgr.com/arch.html.

*Главный редактор* С.И. Макаренко
*Редакционная коллегия:*
А.В. Баженов, П.А. Будко, В.В. Борисов, Е.В. Гречишников, В.М. Коровин (тех. ред.), Ю.А. Кропотов, В.И. Левин, Г.И. Линец, А.С. Марков, Р.Л. Михайлов, Е.А. Новиков, С.С. Семенов

*Правила для авторов*

**Материалы, представляемые в редакцию**

1. Файл со статьей, оформленной по образцу (http://sccs.intelgr.com/download/article.doc).
2. Сканированную копию экспертного заключения об отсутствии в статье материалов, запрещенных к открытому опубликованию, в файле формата jpg, 300 dpi, в цвете.
3. По отдельному запросу редакции файлы с рисунками, выполненные в векторном формате vsd, wmf, emf, или в растровых форматах png или jpg.
4. Указание на необходимость оформления авторских справок о публикации, их количестве и порядке отправки авторам.
5. Авторы могут подготовить краткое сообщение рецензенту, дополнительно поясняющее отдельные элементы работы, их суть и новизну, рамки исследования, связь своей работы с имеющимися публикациями в предметной области. Данное сообщение необязательно, но, при его наличии, оно будет передано рецензенту вместе со статьей.

**Порядок рецензирования и принятия статьи к публикации**

1. Авторский коллектив представляет в редакцию статью и сопроводительные материалы на адрес sccs@intelgr.com.
2. Редакция осуществляет проверку материалов на предмет соответствия требованиям к оформлению и представлению результатов. При необходимости технической правки статьи авторы уведомляются об этом.
3. Если замечаний по оформлению статьи нет, она проверяется в сервисах, выявляющих плагиат, и с результатами проверки передается на рецензирование. Редакция уведомляет авторов о передаче статьи на рецензирование.
4. Порядок проверки на плагиат и выбор сервиса для проверки определяется редакцией самостоятельно. Для проверки на плагиат редакцией используются Интернет-сервисы Антиплагиат, TEXT, Content-watch, а также программы Etxt и Advego Plagiatus.
5. В случае положительного решения рецензентов о возможности публикации статьи авторы уведомляются об этом. В случае несовпадения мнений рецензентов о возможности публикации статьи, она передается на повторное рецензирование или рассматривается редакционной коллегией журнала, о чем уведомляется авторский коллектив. В случае решения рецензентов или редакционной коллегии журнала о невозможности публикации статьи авторы получают мотивированный отказ.
6. По решению рецензентов или редакционной коллегии статья может быть принята к публикации, но с доработками. В этом случае авторы должны в короткий срок переработать статью в соответствии с замечаниями рецензентов, либо дать мотивированный ответ по замечаниям. Если доработка статьи потребует значительного времени, авторы должны уведомить об этом редакцию.
7. После принятия статьи к публикации, авторы оплачивают редакционные расходы, связанные с публикацией статьи.
8. После оплаты редакционных расходов статья размещается в очередном номере журнала на сайте издательства. Авторы уведомляются о публикации их статьи по электронной почте.
9. После формирования очередного номера журнала данные об опубликованных в нем статьях в течение трех месяцев передаются в наукометрические базы учета научных публикаций.

*Требования к оформлению статей, представляемых в редакцию*

Пример оформления статьи доступен по адресу http://sccs.intelgr.com/download/article.doc

1. Статья представляется в формате Word 97/2000/XP с расширением **doc**.
2. Рекомендуемый объем статьи – **до 50 страниц**. Объем может быть увеличен, если этого требует логика изложения материала.
3. Размер страницы – А4. Все поля (верхнее, нижнее, правое и левое) по 2 см.
4. Текст статьи набирается шрифтом Times New Roman, размер шрифта 14 pt, одинарный междустрочный интервал, абзацный отступ 1,25 см, отступы между абзацами отсутствуют. В основном тексте допускаются выделения курсивом. Латинские буквы для обозначения переменных набираются курсивом; греческие, русские буквы, функции – прямым шрифтом. Цифровые индексы в обозначениях набираются прямым шрифтом.
5. Статья должна начинаться с индекса УДК, выровненного по левому краю. После индекса УДК следует пропуск строки.
6. Название статьи должно точно и однозначно характеризовать содержание статьи. Название статьи – полужирным шрифтом, выравнивание по центру без абзацного отступа. **Название писать строчными (маленькими) буквами**, используя заглавные буквы только там, где это необходимо (в начале первого слова, в названиях, именах собственных, сокращениях и т.п.). Не рекомендуется использовать в названии сокращения, кроме общепринятых в соответствующей предметной области. Точка после заглавия НЕ ставится. После названия статьи следует пропуск строки.
7. Фамилии и инициалы авторов указываются через запятую в последовательности, соответствующей личному вкладу в написание статьи. Фамилии авторов выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Между фамилией и первым инициалом, а также между инициалами ставится неразрывный пробел (Ctrl+Shift+пробел). После фамилий авторов следует пропуск строки.
8. Аннотация выполняется на русском и английском языке в соответствии с рекомендациями по написанию авторского резюме. Оформление аннотации: размер шрифта **11pt**, курсив, абзацный отступ 1,25 см. Заголовки отдельных элементов в структуре аннотации выделяются жирным шрифтом. После аннотации следует пропуск строки.
9. Ключевые слова оформляются так же, как и аннотация, и должны содержать основные понятия и термины, употребляемые в статье. Ключевые слова должны формулироваться таким образом, чтобы при семантическом поиске по ним можно было найти данную статью потенциально заинтересованным ученым. После абзаца с ключевыми словами следует пропуск строки.
10. Для структуризации статьи рекомендуется основной текст разделить по частям, имеющим условные подзаголовки «Введение», «Постановка задачи» («Формализация задачи»), «Модель…» («Методика…», «Метод…»), «Результаты моделирования» («Обоснование…»), «Выводы». Подзаголовки выполняются полужирным шрифтом и выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Перед подзаголовками следует пропуск одной строки.
11. Таблицы выравниваются по центру без абзацного отступа. Текст внутри таблиц может выполняться шрифтом от 10pt до 14pt, в зависимости от степени информационной загрузки ячеек таблиц. Таблицы нумеруются по порядку упоминания, а их названия оформляются в виде «Таблица 1 – Название таблицы» и выравниваются по центру без абзацного отступа. Если таблица выполняется на нескольких станицах, необходимо выставлять признак заголовка для первой строки с наименованиями столбцов, либо дублировать первую строку с наименованиями на следующей странице.
12. Рисунки выполняются в виде внедренных объектов векторной графики, выполненных в формате MS Visio (**vsd**) или в форматах метафайлов Windows (**wmf** или **emf**). В случае невозможности представления рисунков в векторном виде, рисунки выполняются в растровых форматах **jpg** или **png**. Нумерация рисунков последовательная по мере упоминания в статье в виде «Рис. 1. Название рисунка». Номер и название рисунка выравниваются по центру без абзацного отступа. До рисунка и после его названия вставляется пропуск строки. Допускается выполнение рисунков, расположенных параллельно друг другу на одном горизонтальном уровне. В этом случае рисунки и их названия помещаются в таблицу с прозрачными границами.

13. Формулы выполняются в редакторе формул MathType или Microsoft Equation 3.0. Формулы могут быть набраны в основном тексте со вставкой специальных математических символов через меню «Вставка-Символы». **Запрещается набирать формулы во встроенном редакторе формул Microsoft Office 2007 и выше**. Основной шрифт формул набираемых в MathType и Microsoft Equation 3.0, 12 pt или 14 pt. Формулы выравниваются по левому краю с абзацным отступом 2,5 см. При необходимости переноса формул используется общепринятая математическая запись переноса. Формулы, на которые есть ссылки в тексте статьи, должны быть пронумерованы. Номер формулы проставляется с правого края страницы. При оформлении формул, не следует вставлять дополнительные пропуски строки до и после формул.
14. Для облегчения редактирования статьи просим выделять желтым маркером номера формул, номера рисунков, ссылки на литературу, ссылки на формулы и рисунки в основном тексте статьи.
15. В конце статьи, по желанию авторов, могут быть приведены высказывания благодарности за помощь в исследованиях, сведения о грантах, НИРах и ОКРах, в рамках которых выполнялась работа, а также сведения об источниках финансирования исследований. Также в конце статьи авторами могут быть представлены приложения, где содержатся листинги программ, на основе которых выполнялось моделирование, различные объемные таблицы и графики, а также другие элементы, которые с одной стороны являются неотъемлемой частью исследования, а с другой - загромождают текст статьи.
16. Список используемых источников оформляется в соотсветсвии с требованиями к оформлению библиографических ссылок нашего журнала после подзаголовка «Литература», который выполняется полужирным шрифтом, выравниваются по центру страницы без абзацного отступа. Нумерация ссылок определяется порядком их упоминания в статье. При формировании списка литературы не следует использовать функцию автоматического формирования нумерованного списка. После подзаголовка «Reference» литература дублируется на английском языке. При оформлении списка литературы и его перевода редакция настоятельно просит авторов пользоваться и соблюдать требования и рекомендации по оформлению списка литературы и его переводу на английский язык. После списка литературы и Reference следует пропуск строки.
17. После списка Reference указывается дата первого представления статьи в редакцию. Данный абзац выделяется полужирным шрифтом, выравнивание по правому краю страницы.
18. В конце статьи указывается информация об авторах. Данные сведения для каждого соавтора обязательно должны содержать: фамилию, имя, отчество полностью, научную степень, научное звание, должность и полное наименование организации, телефон и e-mail.
19. Статья завершается текстовым блоком, дублирующим название статьи, фамилии и инициалы авторов, аннотацию статьи и ключевые слова на английском языке. Данный текстовый блок начинается с новой страницы и его элементы оформляются так же, как соответствующие элементы на русском языке в начале статьи.

Требования к оформлению блока, содержащего сведения об авторах. Нижеуказанные сведения приводятся по каждому автору отдельно.

1. Фамилия, Имя, Отчество на русском языке.
2. Научная степень и научное звание (если есть) на русском языке.
3. Место работы с указанием страны и города на русском языке. Указывается официальное название, желательно из устава, в именительном падеже. Так как базы цитирования (например, РИНЦ) «привязывают» статью к определенному автору в определенной организации, то неверное указание места работы может привести к тому, что Ваша статья может отсутствовать в списке Ваших публикаций в базах цитирования, а также в списке публикаций сотрудников Вашей организации.
4. Должность на русском языке.
5. Область научных интересов – на русском языке.
6. Адрес электронной почты. Убедительная просьба указывать существующий и действующий адрес электронной почты для КАЖДОГО соавтора.
7. Корреспондентский почтовый адрес (с индексом) для контактов с авторами статьи. Данный адрес можно указать один на всех авторов. Можно указать как рабочий (предпочтительно), так и домашний (по желанию) адрес. Обратите внимание на то, что эта информация будет опубликована в открытом доступе.
8. Телефон для связи.

1. Фамилия, Имя, Отчество на английском языке.
2. Научная степень и научное звание (если есть) на английском языке. При затруднениях, связанных с переводом, просим воспользоваться рекомендациями по переводу должности, ученой степени и ученого звания.
3. Международное название места работы с указанием страны и города на английском языке (желательно, в соответствии с уставом). Переводить по буквам аббревиатуры в названии НЕ НУЖНО. Редакция просит Вас воздержаться от использования аббревиатур и сокращений, кроме аббревиатур, указывающих на организационно-правовую форму места работы автора (ФГБОУ, ООО, ОАО и т. п.).
4. Должность на английском языке. При затруднениях, связанных с переводом, просим воспользоваться рекомендациями по переводу должности, ученой степени и ученого звания.
5. Область научных интересов – на английском языке (Field of research: …).
6. Адрес электронной почты. Убедительная просьба указывать существующий и действующий адрес электронной почты для КАЖДОГО соавтора.
7. Корреспондентский почтовый адрес (с индексом) для контактов с авторами статьи. Данный адрес можно указать один на всех авторов. Можно указать как рабочий (предпочтительно), так и домашний (по желанию) адрес. Обратите внимание на то, что эта информация будет опубликована в открытом доступе.
8. Телефон для связи.

Следует учесть, что данные, приведенные в сведениях об авторах (электронный и обычный адрес, телефоны и факс), должны позволять редакции быстро связаться с авторами статей. Если такая связь оказывается невозможной, то это может привести к задержке в публикации статьи. Следует иметь в виду, что редакция не имеет возможности для ведения длительных междугородних телефонных переговоров. Поэтому настоятельно рекомендуется всю переписку с редакцией вести по электронной почте. Редакция настоятельно рекомендует приводить действующие и часто просматриваемые электронные адреса.

При написании работ просим авторов воспользоваться рекомендациями по написанию научных статей.

*Минимальные системные треюования:*

- процессор: Intel x86, x64, AMD x86, x64 не менее 1 ГГц;
- оперативная память RAM ОЗУ: не менее 512 МБайт;
- свободное место на жестком диске (HDD): не менее 120 МБайт;
- операционная система: Windows XP и выше;
- Adobe Acrobat Reader;
- дисковод CD-ROM;
- мышь.

ООО «Корпорация «Интел Групп»

**Системы управления, связи и безопасности**

Научный журнал

*Адрес редакции:*
197372, Санкт-Петербург, пр. Богатырский, д. 32, к. 1 лит. А, пом. 6Н.
Тел.: (812) 945-50-63.
http://sccs.intelgr.com
E-mail: sccs@intelgr.com

Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77 - 61239 от 03.04.2015 г.

Подписано к использованию 22.03.2017
Объем издания – 14,5 Мб.
Комплектация издания – 1 CD.
Тираж 100 экз.

УДК 658.51

# Математическая модель функционирования производственных процессов с учетом их особенностей

Догадина Е. П., Холкина Н. Е.

***Постановка задачи:*** *системы массового обслуживания являются стандартной математической моделью для описания многих технических, биологических и других систем. При этом в таких областях, как автоматизация управления производственными процессами, управление мониторингом окружающей среды, планирование боевых действий и т.п., реальные системы характеризуются функционированием в неустановившемся режиме и изменением их параметров в зависимости от состояний системы. Это приводит к необходимости использования математических моделей обслуживания, называемых в дальнейшем нестационарными системами обслуживания и формализуемых с помощью систем дифференциальных уравнений.* ***Целью данной работы*** *является разработка и исследование математической модели функционирования производственных процессов на базе нестационарных систем массового обслуживания, обладающих свойствами ординарности и отсутствия последействия. В работе рассматриваются производственные процессы с последовательной временной и ячеистой пространственной структурой, характерной для мелкосерийного типа производства.* ***Используемые методы:*** *в исследованиях применялись методы аппарата теории массового обслуживания, методы решения систем дифференциальных уравнений первого порядка, теория Марковских процессов.* ***Результат:*** *разработана и исследована математическая модель функционирования производственных процессов с учетом параметров, изменяющихся во времени. Определены характеристики нестационарного производственного процесса в зависимости от изменения интенсивностей поступления и обслуживания заявок во времени. Использование полученной модели позволяет наиболее полно представлять процесс функционирования производственных процессов с последовательной временной и ячеистой пространственной структурой, характерной для мелкосерийного типа производства.*

***Ключевые слова:*** *система массового обслуживания, нестационарность, производственные процессы.*

## Введение

Наиболее полно производственные процессы отображают системы массового обслуживания (СМО). В работе [1] представлена математическая модель простейшего нестационарного потока. Большинство рассматриваемых в теории массового обслуживания моделей укладываются в данную схему. Но при рассмотрении некоторых математических вопросов организации производства и процессов функционирования производства использование данной модели затруднено из-за следующих факторов [2, 5, 6]:

1) Структура системы предполагается неизменной, в то время как реальные системы могут варьировать свои параметры.
2) Исследование проводится чаще всего для установившегося режима работы, хотя для производственных процессов характерно выполнение работ с непостоянным темпом работы, зависящим от многих факторов.

Рассмотрение стационарных моделей ранее было связано с ограничениями прежде всего вычислительного характера, но в настоящее время данное ограничение не носит существенного характера при исследовании большинства систем. В связи с данными недостатками уже существующей

модели системы обслуживания [1] необходимо разработать математическую модель производственных процессов с учетом стационарных и нестационарных параметров и критериев. Кроме того, существующие на сегодняшний день системы не в полной мере решают задачу автоматизации управления производственными процессами в связи с появлением новых информационных технологий. Поэтому необходимо разработать математическую модель управления процессами с учетом особенностей процессов (последовательной временной и ячеистой пространственной структуры) в зависимости от их структуры и нестационарных параметров.

Под нестационарной производственной системой будем понимать систему, которая не имеет установившегося режима работы, а также может определяться изменением характеристик процесса поступления заявок и процесса их обслуживания в зависимости от времени и состояния системы [2].

## Обобщенная математическая модель функционирования производственных процессов

Для описания функционирования производственных процессов как нестационарных систем массового обслуживания будем использовать следующие основные характеристики: ёмкость источника заявок $N_0(t)$, длина очереди заявок $Q_0(t)$ и число устройств обслуживания $M_0(t)$ [1-3].

В каждый момент времени производственный процесс может находиться в одном из состояний, определяемых такими характеристиками, как число функционирующих устройств обслуживания $M(t)$, число занятых устройств $Z(t)$ и число заявок в очереди $Q(t)$. Пусть $S(m,z,q)$ представляет собой состояние, когда в системе используется $m$ устройств, из них занято обслуживанием $z$ устройств и $q$ заявок находится в очереди.

Для описания интенсивностей поступления заявок в систему и интенсивностей обслуживания заявок введем векторные величины $\lambda(t)$ и $\mu(t)$.

Разработаем математическую модель функционирования производственных процессов с учетом стационарности и нестационарности параметров и критериев на основе построения систем дифференциальных уравнений Колмогорова на рассматриваемом интервале времени функционирования $t \in \{0,T\}$ [1, 2, 4–6].

$$\frac{dp_a(t)}{dt} = -\sum_{\substack{a,b\in N' \\ b\neq a}} d_{ab}(t)\cdot p_a(t) + \sum_{\substack{a,c\in N' \\ c\neq a}} d_{ca}(t)\cdot p_c(t) \qquad (1)$$

где $N'$ – множество пар индексов состояний $N' = \{(a,b)\in N^2 | d_{ab} = (S_a, S_b)\}$ и $N = \{0,1,2,...\}$.

Использование в математической модели переменных *a*, *b*, *c* говорит о том, что система находится в состояниях $S(m_a,z_a,q_a)$, $S(m_b,z_b,q_b)$ и $S(m_c,z_c,q_c)$ соответственно. Интегрирование этой системы дает искомые вероятности как функции времени [2, 3, 7]. Начальное состояние выражено как

$$p_a(0) = p_{a0} > 0, \quad a \in N. \tag{2}$$

Также необходимо соблюдать условие нормировки

$$\sum_{a \in N} p_a(t) = 1. \tag{3}$$

Данная математическая модель имеет ряд особенностей [2]:

1) характеристики системы и интенсивности поступления и обслуживания заявок представлены в векторной форме, что расширяет круг исследуемых заявок;
2) состояния системы представляют собой состояния, когда в системе используются значения трех характеристик, а именно: число используемых устройств, число занятых под обслуживанием устройств, число заявок, находящихся в очереди.
3) плотности являются функциями характеристик, задающих исходные состояния для перехода, и интенсивностей потоков, происходящих в системе.

Плотность $d_{ab}(a \neq b)$ перехода из состояния $S_a$ в состояние $S_b$ определена следующим образом

$$d_{ab} = \begin{cases} \mu_a(t), b = a - 1, t \in \{0, T\} \\ \lambda_a(t), b = a + 1, t \in \{0, T\} \\ 0, a \neq b, a = 0,1,2\ldots; \end{cases}$$

В работе представлен технологический процесс изготовления изделия громкоговорителя рупорного П-05-01 (рис. 1).

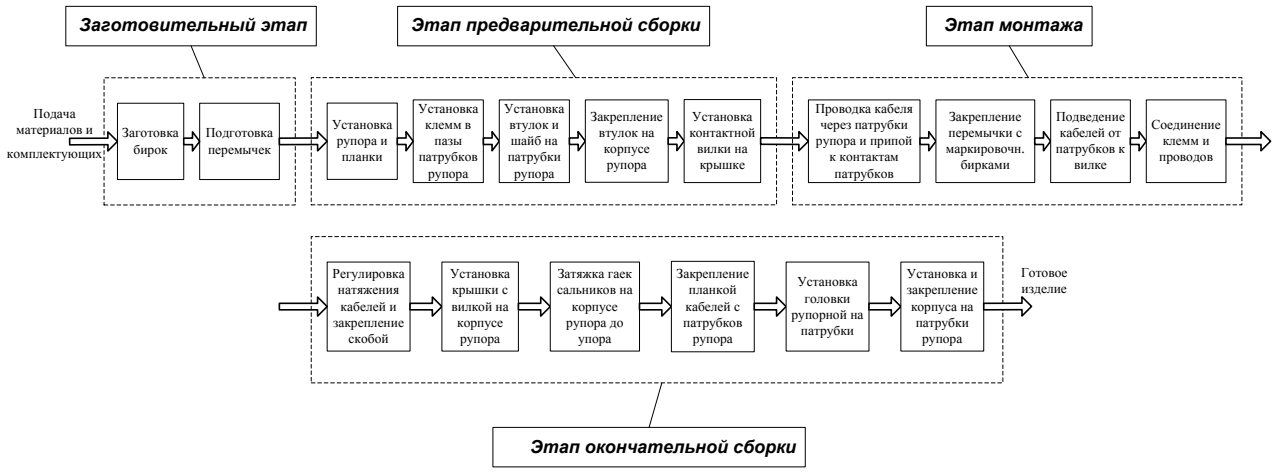



Рис. 1. Структурная схема производства изделия П-05-01

Данный процесс наиболее явно отображает принцип мелкосерийного производства с последовательной временной и ячеистой пространственной структурой.

В зависимости от количества типов персонала, выполняющих один из этапов, реализацию технологического процесса можно представить в виде трех случаев:

1. Каждый этап выполняется последовательно обслуживающим персоналом в течение всего рабочего дня.

2. Операции «Подготовка бирок», «Подготовка проводов» и этап «Предварительная сборка» выполняются параллельно, а этапы «Монтаж» и «Окончательная сборка» идут последовательно.
3. Операции «Подготовка бирок» и «Подготовка проводов» идут последовательно относительно друг друга и параллельно с этапом «Предварительная сборка». Далее этапы «Монтаж» и «Окончательная сборка» идут последовательно.

Работы по производству устройства опишем с помощью разработанных математических моделей (1–3).

Поскольку программная реализация поставленной задачи оптимизации решается в среде MatLab (в которой индексы переменных начинаются с единицы, а не с нуля), то математическая модель функционирования технологического процесса изготовления устройства имеет вид (4–6).

$$\begin{aligned}
&\frac{dp_1(t)}{dt} = -\lambda(t)p_1(t) + \mu(t)p_2(t);\\
&\frac{dp_i(t)}{dt} = -(\lambda(t) + (i-1)*\mu(t))p_i(t) + \lambda(t)p_{i-1}(t) +\\
&+ i*\mu(t)p_{i+1}(t), i = \overline{2,M};\\
&\frac{dp_{j+M}(t)}{dt} = -(\lambda(t) + M*\mu(t))p_{j+M}(t) + \lambda(t)p_{j+M-1}(t) +\\
&+ M*\mu(t)p_{j+M+1}(t),\ j = \overline{1,Q};\\
&\frac{dp_{Q+M+1}(t)}{dt} = \lambda(t)p_{Q+M}(t) - M*\mu(t)p_{Q+M+1}(t).
\end{aligned} \tag{4}$$

$$p_k(0) = p_{k0} > 0, \qquad k = \overline{1, M+Q+1}. \tag{5}$$

Кроме того, должно выполняться нормировочное условие.

$$\sum_k p_k(t) = 1, t \in [0,T]. \tag{6}$$

В модели (4–6) $M$ – количество персонала, выполняющего этапы параллельно; $Q$ – длина очереди устройств, необходимых сконструировать; $\lambda(t)$ – интенсивность поступления набора деталей для устройства, распределенная по определенному закону распределения; $\mu(t)$ – интенсивность изготовления устройств из деталей, распределенная по определенному закону распределения; $T$ – рассматриваемое время работы системы, ограниченное 8-мичасовым рабочим днем; $p_k$ – вероятность пребывания системы в состоянии, при котором необходимо изготовить $k$ устройств, $k = \overline{2, M+Q+1}$.

Система (4), (5), (6) является математической моделью функционирования производственных процессов с последовательной временной и ячеистой пространственной структурой.

Состояния нестационарных производственных процессов обычно определяются по числу заявок, находящихся в системе. В общем случае состояния производственных процессов характеризуются вектором параметров,

включающего в себя число фаз системы, количество типов заявок и устройств, ёмкость источника заявок и длина очереди в системе и т.п., что приводит к резкому увеличению числа состояний нестационарной системы, а значит и порядка системы дифференциальных уравнений (4).

Из разработанной математической модели функционирования производственных процессов с учетом стационарности и нестационарности параметров, учитываемых в выражениях (1–3), можно получить наиболее распространенные в практическом плане вероятности состояний производственного процесса в установившемся и неустановившемся режимах. Практические задачи с применением производственных процессов в установившихся режимах функционирования рассмотрены в работах [1, 5, 7].

На практике большой интерес представляют процессы производства, использующие в качестве модели системы обслуживания замкнутую систему массового обслуживания. Замкнутая СМО – это система, интенсивность потока поступления заявок которой зависит от самой системы массового обслуживания. Данный тип систем также укладывается в процесс функционирования математической модели процессов с учетом стационарности и нестационарности параметров (1–3). Поэтому для анализа эффективности замкнутой СМО можно применить обобщенную модель (1).

Система уравнений для замкнутой многоканальной нестационарной СМО с ожиданием имеет вид:

$$\begin{aligned}
&\frac{dp_1(t)}{dt} = -N\lambda(t)p_1(t) + \mu(t)p_2(t)\\
&\frac{dp_i(t)}{dt} = -((N-(i-1))\cdot\lambda(t) + (i-1)\cdot\mu(t))p_i(t) + (N-(i-1)-1)\cdot\lambda(t)p_{i-1}(t) +\\
&\qquad + i\cdot\mu(t)p_{i+1}(t), \quad i=\overline{2,M};\\
&\frac{dp_{j+M}(t)}{dt} = -((N-M-j-1)\cdot\lambda(t) + M\cdot\mu(t))p_{j+M}(t) +\\
&\qquad + (N-M-j)\cdot\lambda(t)p_{j+M-1}(t) + M\cdot\mu(t)p_{j+M+1}(t), \quad j=\overline{1,Q};\\
&\frac{dp_{Q+M+1}(t)}{dt} = (N-M-Q)\cdot\lambda(t)p_{Q+M}(t) - M\cdot\mu(t)p_{Q+M+1}(t);
\end{aligned} \tag{7}$$

$$p_i(0) = p_{i0} > 0, \qquad i=\overline{1,M+Q+1}. \tag{8}$$

где $p_i$ – вероятность пребывания системы в состоянии, в котором $i$ объектов требуют обслуживания и $i$ каналов заняты их обслуживанием $i=\overline{2,M}$; $p_{j+M}$ – вероятность пребывания системы в состоянии, в котором $j$ объектов требуют обслуживания и находятся в очереди, $j=\overline{1,Q}$; $M$ – число каналов; $N$ – число объектов, ожидающих обслуживание; $Q$ – длина очереди.

Кроме того, должно выполняться нормировочное условие

$$\sum_i p_i(t) = 1, t \in \{0,T\}. \tag{9}$$

В результате получена система дифференциальных уравнений (7) с нормировочным условием (8) и начальными условиями (9).

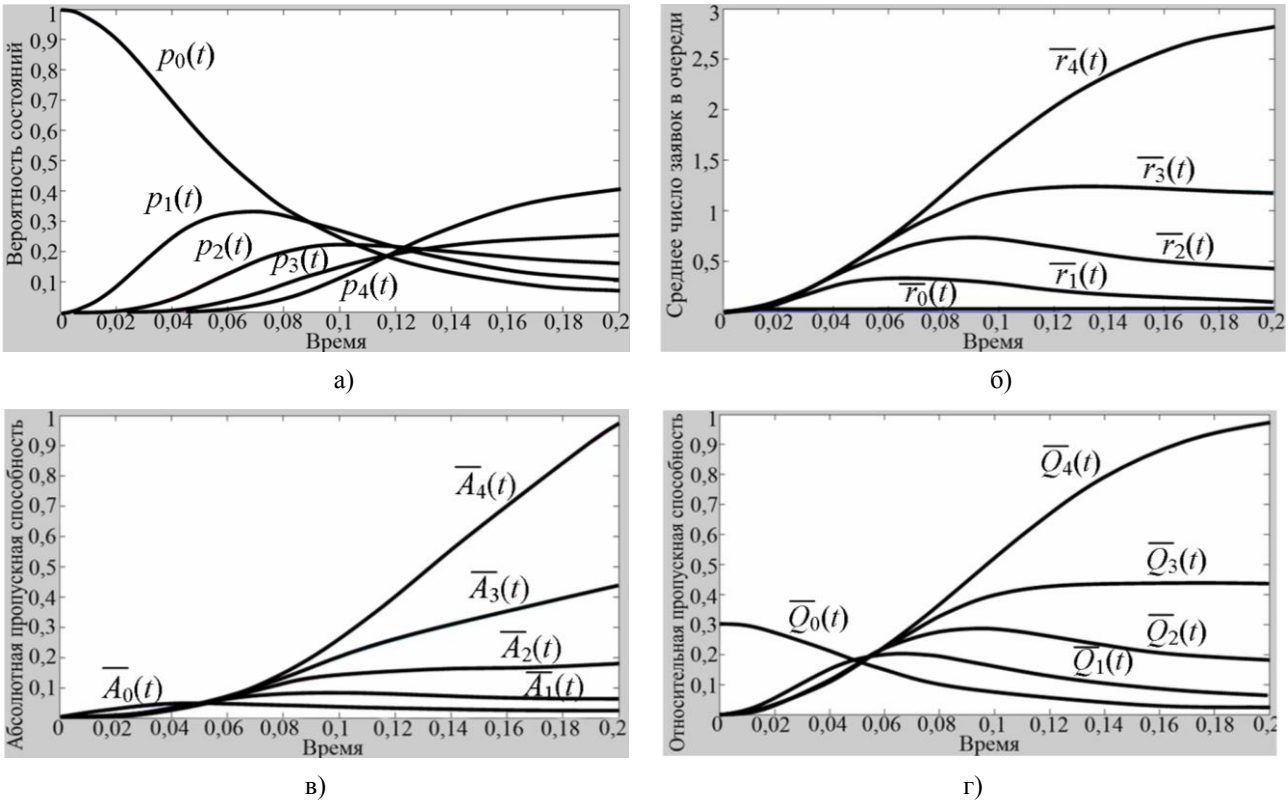



Рис. 2. Графики распределения характеристик системы: а) вероятностей состояний; б) числа заявок в очереди; в) абсолютной пропускной способности системы; г) относительной пропускной способности системы

С помощью разработанной математической модели функционирования производственных процессов с учетом стационарности и нестационарности параметров, учитываемых в выражениях (1–3), на основании существующих материалов [1, 2, 5] определим дополнительные характеристики системы:

– среднее число функционирующих устройств в момент времени $t$

$$\overline{m}(t) = \sum_{a \in N} m_a p_a(t);$$

– среднее число занятых каналов и среднее число обслуживаемых заявок в момент времени $t$

$$\overline{\omega}(t) = \sum_{a \in N} z_a p_a(t);$$

– среднее число заявок в очереди в момент времени $t$

$$\overline{r}(t) = \sum_{a \in N} q_a p_a(t);$$

– среднее число заявок в системе в момент времени $t$

$$\overline{z}(t) = \overline{\omega}(t) + \overline{r}(t);$$

– среднее число заявок, которое может обслуживать система в момент времени $t$ (абсолютная пропускная способность системы)

$$\overline{A}(t) = \overline{z}(t) \cdot \mu(t);$$

– средняя доля поступивших заявок, обслуживаемых системой, к моменту времени $t$ заявок (относительная пропускная способность системы)

$$\overline{Q}(t) = \frac{\overline{A}(t)}{\lambda(t)}.$$

На рис. 2 показаны результаты вычислений дополнительных характеристик производственных процессов на базе нестационарной одноканальной системы с ограниченной емкостью очереди ($q = 3$) для числа состояний системы $S$ = 5. В работе определены вероятности $p_0(t)$, $p_1(t)$, $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$ нахождения системы в данных состояниях $S_0(t)$, $S_1(t)$, $S_2(t)$, $S_3(t)$, $S_4(t)$. Интенсивность поступления и обслуживания заявок изменяется пропорционально времени $t \in \{0 \div 0{,}2\}$.

## Выводы

В работе сформулирована математическая модель определения вероятностей состояний системы обслуживания. Каждое состояние системы определено тремя характеристиками: числом функционирующих устройств обслуживания, числом занятых устройств и длиной очереди. На основании этого и правила построения системы дифференциальных уравнений Колмогорова разработана математическая модель реализации производственных процессов и вычислены основные характеристики системы на примере функционирования производственного процесса. Использование полученной модели позволяет наиболее полно представлять процесс функционирования производственных процессов с последовательной временной и ячеистой пространственной структурой, характерной для мелкосерийного типа производства.

## Литература

1. Гнеденко Б. В., Коваленко И. Н. Введение в теорию массового обслуживания. – М.: Наука, 1987. – 336 с.

2. Догадина Е. П., Кропотов Ю. А., Суворова Г. П. Математическая модель определения вероятностей состояний системы обслуживания // Радиотехника. 2009. № 11. С. 103-105.

3. Догадина Е. П., Кропотов Ю. А., Суворова Г. П. Вероятностные модели прогнозирования экологического состояния // Радиотехника. 2009. № 11. С. 106-108.

4. Майоров С. А. Основы теории вычислительных систем. – М.: Высшая школа, 1978. – 408 с.

5. Саати Т. Л. Элементы теории массового обслуживания и ее приложения. – М.: Сов. радио, 1971. – 520 с.

6. Догадина Е. П., Кропотов Ю. А. Разработка программного комплекса для выявления зависимостей характеристик систем массового обслуживания на примере распределения вероятностей состояний вычислительной системы во

времени // Методы и устройства передачи и обработки информации. 2009. № 11. С. 336-340.

7. Догадина Е. П., Кропотов Ю. А., Суворова Г. П. Оценка параметров вычислительных процессов при циклическом планировании // Информационные системы и технологии. 2010. № 3 (59). С. 12-19.

## References

1. Gnedenko B. V., Kovalenko I. N. *Vvedenie v teoriju massovogo obsluzhivanija* [Introduction to queueing theory]. Moscow, Nauka Publ., 1987. 336 p. (in Russian).

2. Dogadina E. P., Kropotov U. A., Suvorova G. P. Mathematical model of the determination of probability of the conditions of the system of the service. *Radiotekhnika*, 2009, no 11, pp. 103-105 (in Russian).

3. Dogadina E. P., Kropotov U. A., Suvorova G. P. Probabilistic models of the forecasting of the ecological condition. *Radiotekhnika*, 2009, no 11, pp. 106-108 (in Russian).

4. Mayorov S. A. *Osnovy teorii vychislitel'nyh sistem* [Bases to theories of the computing systems]. Moscow, Vyisshaya shkola Publ., 1978. 408 p. (in Russian).

5. Saati T. L. *Jelementy teorii massovogo obsluzhivanija i ee prilozhenija* [Elements queueing theory and its exhibits]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1971. 520 p. (in Russian).

6. Dogadina E. P., Kropotov U. A. Development of the programme complex for revealing the dependencies of the features of the systems of mass service on example of the distribution of probability of the conditions of the computing system at time. *Methods and devices of information transmission and processing*, 2009, no 11, pp. 336-340 (in Russian).

7. Dogadina E. P., Kropotov U. A., Suvorova G. P. Estimation parameter computing processes under round-robin planning. *Information systems and technologies*, 2010, no 3(59), pp. 12-19 (in Russian).

**Статья поступила 25 ноября 2015 г.**

## Информация об авторах

*Догадина Елена Петровна* – кандидат технических наук. Доцент кафедры электроники и вычислительной техники. Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых. Область научных интересов: системы автоматизации, проектирования и управления; оптимизация. Тел.: +7(49234)772-72. E-mail: delena86@yandex.ru

*Холкина Наталья Евгеньевна* – Доцент кафедры электроники и вычислительной техники. Муромский институт (филиал) Владимирского государственного университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевич Столетовых. Область научных интересов: геоэлектрический мониторинг, телекоммуникационные информационно-управляющие системы. Тел.: +7(49234)77-272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Адрес: Россия, 602264, г. Муром, ул. Орловская, д. 23.

---

## Mathematical Model of the Production Processes, Taking into Account Their Specific Features

E. P. Dogadina, N. E. Kholkina

***Statement of the problem***. *Stationary Queuing systems are standard mathematical model to describe many engineering, biological and other systems. However, in areas such as automation process control, management of environmental monitoring, planning combat actions, real systems are characterized by running in unsteady mode. The parameters of the real systems depend on the States of the system. Non-stationary queueing systems as mathematical models of these real systems are more than adequate. These queueing systems are formalized on the basis of systems of differential equations.* ***The purpose of the work***. *We have developed and investigated a mathematical model of the production process on the basis of non-stationary queueing systems. Production processes are considered In work with consequent time and cellular spatial structure typical of small serial type production.* ***The methods used.*** *Methods of the device queueing theory, methods of the decision of the systems of the differential first-order equations, theory Markovskih processes.* ***Result***. *A mathematical model of the production process was studied taking into account the parameters varying in time. The non-stationary characteristics of the production process have been identified depending on changes of intensities of the income and service of requests in time. Use got models allows most packed to present the process of the operating the production processes with consequent time and cellular spatial structure typical of small serial type production.*

***Key words***: *queuing system, non-stationary queueing system, unsteadiness, production processes.*

## Information about Authors

*Elena Petrovna Dogadina* – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor at the Department of Electronics and Computer Science. Murom Institute (Branch) of the Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs. Field of research: systems to automations, designing and management; optimization. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: delena86@yandex.ru

*Natalia Evgenievna Kholkina* – Associate Professor at the Department of Electronics and Computer Science. Murom Institute (Branch) of the Vladimir State University named after Alexander and Nickolay Stoletovs. Field of research: telecommunication information and control systems. Ph.: +7(49234)77272. E-mail: kaf-eivt@yandex.ru

Address: Russia, 602264, Murom, st. Orlovskaya, h. 23.

УДК 622.232.8:621.384.3.01:531.714.2

# Квантово-каскадные лазеры и их применение в системах обеспечения безопасности и связи

Волков В. Г.

***Целью работы*** *является описание современного уровня разработки квантово-каскадных лазеров (ККЛ), их характеристик и возможностей, а также оценка целесообразности применения ККЛ в системах обеспечения безопасности и связи.* ***Используемый метод исследования*** *– методика расчета дальности распознавания и целеуказания в тепловизионные приборы (ТВП), выполненные на основе матриц микроболометров, при совместной работе ТВП с ККЛ.* ***Новизна:*** *впервые рассматривается вопрос применения ККЛ в системах обеспечения безопасности и связи.* ***Результаты работы:*** *создание ТВП с инфракрасными (ИК) осветителями или целеуказателями на основе ККЛ в стационарном, мобильном, переносном и портативном (наголовном) исполнении обеспечивает сохранение дальности распознавания и целеуказания в ТВП при падении уровня температурного контраста объекта с фоном не менее чем в 10 раз по сравнению с нормированной его величиной. Применение ККЛ на основе конкретных примеров приводит к созданию систем круглосуточного и всепогодного действия, в том числе универсальных прицельных комплексов, комбинированных ИК осветителей-целеуказателей, лазерных дальномеров и измерителей скорости. Применение ККЛ в системах досмотра на основе использования Т-лучей позволит работать в области спектра до 300 мкм и создать переносную и портативную аппаратуру. Применение ККЛ в лазерных атмосферных системах связи позволяет обеспечить их всепогодность. Аналогичные известные публикации по данным вопросам отсутствуют.* ***Практическая значимость:*** *результаты работы могут быть использованы для создания приборов наблюдения, прицеливания, вождения патрульных автомашин, прицеливания и целеуказания, точного измерения дальности и скорости всепогодного и круглосуточного действия в интересах служб безопасности и ГИБДД, а также всепогодных систем атмосферной лазерной связи.* ***Перспективы дальнейшего развития результатов работы*** *– применение в приборах более мощных ККЛ с мощностью более 100 Вт в непрерывном и в импульсном режиме при комнатной температуре, обеспечение высокого к.п.д. ККЛ при работе в непрерывном режиме свыше 30%, создание коротковолновых ККЛ для области спектра 2-4 мкм, заполнение пробела 20-70 мкм в рабочем диапазоне длин волн ККЛ, повышение мощности излучения терагерцовых ККЛ и обеспечение их работы при термоэлектрическом охлаждении.* ***Выводы:*** *новое поколение приборов для систем обеспечения безопасности и связи позволяет устранить известный недостаток ТВП – резкое снижение их дальности при пониженных температурных контрастах объекта с фоном, а для систем измерения дальности, скорости и атмосферной связи – обеспечить их круглосуточную и всепогодную работу.*

***Ключевые слова:*** *квантово-каскадный лазер, рабочая область спектра, мощность излучения, эффективность, терагерцовый диапазон длин волн, системы безопасности, атмосферная связь, дальность, скорость, точность измерения, угол поля зрения.*

## Актуальность

В настоящее время интенсивно развивается новое и перспективное направление квантовой электроники – квантово-каскадные лазеры (ККЛ). Их уникальные свойства нашли целый ряд применений в современной науке и технике. В связи с этим представляется целесообразным рассмотреть возможности ККЛ и их применение в системах обеспечения безопасности и связи.

## Появление ККЛ

Появлению ККЛ (QCL – quantum cascade laser) предшествовал целый ряд исследований. В 1971 г. впервые Казариновым Р. А., Сурисом Р. А. была предложена идея использовать внутренние минизонные переходы и туннелирование для каскадного усиления света [1]. Эта идея определяла возможность создания ККЛ на оптических переходах между подзонами одной энергетической зоны. В качестве излучающего материала исследователи из Принстонского университета использовали много слоев полупроводника толщиной всего в один атом. Во время испытаний ученые обнаружили, что их устройство испускает не один луч, а два с различными длинами волн. При этом у второго луча обнаружились новые свойства [2–26]. Во-первых, оказалось, что два луча "конкурируют". При увеличении силы тока мощность обычного луча возрастала, в то время как второй ослабевал. Во-вторых, при росте температуры до определенного значения мощность второго луча увеличивалась, в то время как у обычных лазерных диодов она уменьшается [4]. Преимуществами ККЛ являются более низкое по сравнению с современными аналогами энергопотребление, а также более высокая температура работы. В настоящее время исследователи работают над схемой, которая позволила бы "отсекать" первое излучение, добившись появления луча только второго типа [4].

## Классификация ККЛ и их основные свойства

Классификация ККЛ основана на их различии по типу соединения, по типу сверхрешетки и по типу активной области [2, 3]. По типу соединения различают ККЛ на основе AlInAs/GaInAs, GaAs/AlGaAs, InAs/AlSb, Si/SiGe, InGaAs/InGaP, InGaAs/AlAs. По типу сверхрешеток различают структуры ККЛ с плавно меняющимся периодом, с двойным оптическим резонансом, на переходах уровень – минизона. По типу активной области (легированной или нелегированной) различают структуры с одной квантовой ямой (КЯ), с двумя КЯ, с тремя КЯ [2, 3]. ККЛ – униполярный прибор, обеспечивающий излучение фотонов при межзонных переходах. В ККЛ каждый электрон излучает $N_p$ фотонов ($N_p$ – число каскадов). В обычном полупроводниковом лазере происходит рекомбинация электронно-дырочных пар через запрещенную зону полупроводника, не заполненную электронами, с излучением одного фотона. В ККЛ каждый электрон многократно излучает фотон при переходе от одного активного слоя в другой [5, 6]. Число активных слоев толщиной в один атом может быть 1000–2000. В ККЛ происходит генерация излучения, когда электрон перемещается между гетероструктурами полупроводника внутри одной зоны. Эти слои чуть различаются по толщине и разделены слоями другого материала, поэтому разные уровни энергии образуют своего рода «лестницу», с которой электрон и «спускается», излучая фотон на каждой «ступени» [7–10]. Частота генерации задается путем подбора толщины слоев и перестраивается с помощью приложенного напряжения [9]. Второй луч в ККЛ реабсорбирует (т.е. поглощает) только 10% выпущенных фотонов по сравнению с первым лучом. Это определяет высокую эффективность ККЛ, в особенности при высоких рабочих температурах. Благодаря этому возможна

генерация в ККЛ длинноволнового инфракрасного (ИК) излучения при высоких температурах [10]. Рабочая температура ККЛ значительно превышает комнатную – доходит до 400 К, а характеристическая температура может достигать 500 К [7]. Особенно большую мощность излучения ККЛ генерируют в области спектра 4–5 мкм: до 5 Вт в непрерывном и 120 Вт в импульсном режиме при 300 К. Для одномодовых ККЛ типичная мощность излучения составляет около 0,1 Вт, хотя в отельных случаях может быть на порядок выше. К.п.д. «от розетки» ККЛ с большим числом каскадов при низких температурах может превышать 50% [7]. Основные параметры типичных ККЛ приведены в приложении 1, внешний вид активной среды ККЛ показан на рис. 1 [2, 4], на рис. 2 – структура ККЛ [2]. Внешний вид типичных ККЛ – на рис. 3–6 [26–29].

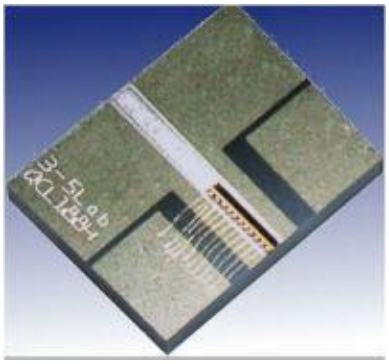


Рис. 1. Активная среда ККЛ

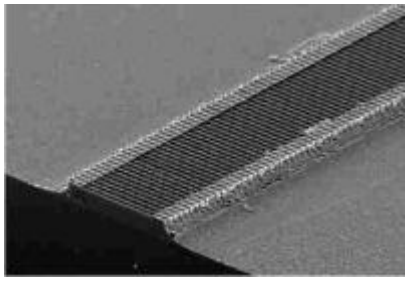


Рис. 2. Структура ККЛ

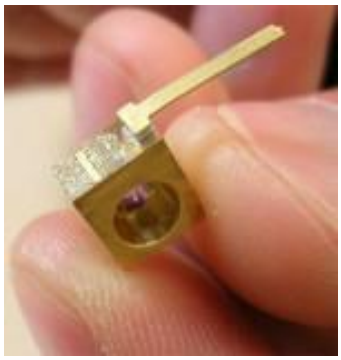


Рис. 3. Внешний вид ККЛ фирмы Frankfurt Laser Company

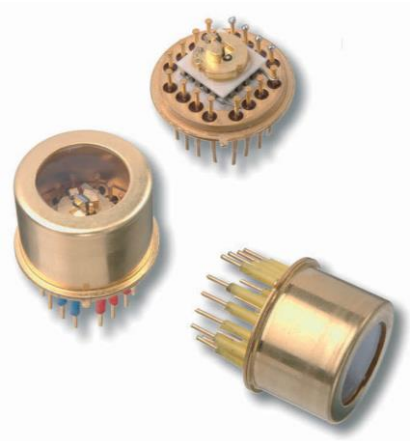


Рис. 4. Внешний вид ККЛ фирмы Азимут Фотоникс

Рис. 5. Внешний вид ККЛ фирмы Hamamatsu

Рис. 6. Внешний вид ККЛ фирмы Wlaser. Co.

**Рабочий спектральный диапазон ККЛ**

ККЛ могут работать в ИК области спектра от 2,7 мкм до 300 мкм [2, 3]. При этом ККЛ на основе AlInAs/GaInAs излучают в области спектра 3,6-100 мкм, а ККЛ на основе Si/SiGe – в области спектра 7,5-9,5 мкм. Рабочая область спектра ККЛ на основе GaAs/AlGaAs простирается от 8 мкм до 300 мкм. Область генерации определяется в основном толщинами квантово-размерных слоев, уровнем легирования, а также высотой потенциальных

барьеров в зоне проводимости. Использование последовательности узкозонных и широкозонных соединений на основе InAs/AlSb позволяет увеличить высоту потенциальных барьеров в зоне проводимости до ≈2 эВ. Это перспективно для создания коротковолновых ККЛ, работающих в области спектра 2–5 мкм. Альтернативными соединениями для создания коротковолновых ККЛ являются также структуры на основе InGaAs/InGaP, выращенные на подложке GaAs, а также InGaAs/AlAs. Хотя ККЛ излучают в средней и дальней ИК областях спектра, между ними существует спектральная область, в которой ККЛ не работают [11]. Перестройка длины волны в ККЛ с распределенной обратной связью (РОС ККЛ) может обеспечиваться в пределах 10–20 см$^{-1}$, а при использовании внешнего дисперсионного резонатора – от 100 до 500 см$^{-1}$ [7].

## Работа ККЛ в терагерцовой области спектра

Особо следует остановиться на работе ККЛ в терагерцовой области спектра. Строго говоря, такое название, принятое в литературе, не совсем корректно. Ведь терагерцовый диапазон простирается от ультрафиолетовой до дальней инфракрасной области спектра. В современной литературе под терагерцовым диапазоном понимают только дальнюю ИК область спектра (1 – 30 ТГц). Тем не менее, сохраним здесь такую терминологию вследствие того, что она является общепринятой. Терагерцовые волны (Т-лучи) отражаются от металлов, но проникают через пластмассу, бумагу, сухую древесину, камень, одежду, керамику, тело человека, любые мутные среды и мелкодисперсные материалы из-за резкого подавления рэлеевского рассеяния. В терагерцовом диапазоне лежат вращательные спектры многих органических молекул, включая колебания биологически важных коллективных мод и белков, а также фоновые резонансы кристаллических решеток. Т.к. эти лучи поглощаются по-разному молекулами различных веществ, то их можно использовать для определения каждой составляющей вещества в отдельности [12, 13]. Это позволяет развивать новые методы спектроскопии биологических и полупроводниковых структур. С помощью терагерцового диапазона можно управлять химическими реакциями и манипулировать электронными постоянными в КЯ [12]. В отличие от рентгеновских лучей Т-лучи не опасны, т.к. не производят ионизацию среды и повреждение биологических молекул. Это позволяет производить безвредную для человека диагностику, в том числе раковых опухолей, глубины и степени ожогов. Т-лучи перспективны для беспроводной коммутации компьютеров и периферийных устройств внутри зданий, разработки системы безопасности на основе видения (досмотра) с помощью Т-лучей [12]. Теоретически и экспериментально исследованы структуры ККЛ терагерцового диапазона, выполненные на основе GaAs/$Al_{0,15}$ $Ga_{0,85}$ As, в которых инверсия населенностей возникает за счет испускания оптического фонона. Продемонстрировано использование ККЛ диапазона 3 ТГц для регистрации сигнала примесной проводимости в магнитном поле объемного n-GaAs и напряженной гетероструктуры p-Ge/Ge-Si [2, 3]. ККЛ прочно заняли нишу компактных когерентных перестраиваемых источников излучения терагерцового диапазона. Прецизионное регулирование таких

параметров, как толщина и уровень легирования слоев, позволяет создать ККЛ с новыми функциональными возможностями и улучшенными характеристиками.

## Основные конструкции ККЛ

Рассмотрим различные конструкции ККЛ. Начнем с ККЛ с резонатором Фабри-Перо [16] (рис. 3) [2]. Данный вид лазера – самый простой из ККЛ. Сначала изготавливают оптический волновод из квантово-каскадных материалов для формирования активной среды. Концы прозрачного полупроводника скалываются, чтобы сформировать два параллельных зеркала на обоих концах волновода, таким образом формируя резонатор Фабри-Перо. Остаточного отражения на сколотых краях полупроводника (на воздухе) достаточно, чтобы создать резонатор. ККЛ с резонатором Фабри-Перо способны выдавать большие мощности, но обычно в многомодовом режиме при большом токе. Экономичные Фабри-Перо лазеры имеют многомодовый спектр излучения с полушириной около 30 нм, которая является исключительно подходящей для обнаружения составляющих жидкостей или для линий спектра поглощения газов в области их одинокого расположения, т. е. свободной от линий поглощения других газов Длина волны может быть изменена в основном за счет изменения рабочей температуры ККЛ. ККЛ с распределенной обратной связью (РОС лазеры или DFB – distributed feedback laser). Это – лазер, резонатор которого состоит из активной среды, включающей в себя периодическую структуру. Вследствие этого в ней возникает брэгговское отражение, реализующее распределенную обратную связь. РОС лазер похож на лазер с резонатором Фабри-Перо, похож на лазер Фабри-Перо, но в них встроены брэгговские диэлектрические зеркала на поверхности волновода, чтобы предотвратить излучение на ненужных длинах волн. Это позволяет лазеру работать в нужном режиме, даже при высоких рабочих токах. РОС лазеры могут быть настроены главным образом за счет изменения температуры, но интересный вариант по перестройки длины волны можно получить в импульсном режиме работы лазера. В этом режиме длина волны лазера быстро изменяется в течение импульса (так называемый «чирп», или по-русски, щебетание). Это позволяет производить быстрое сканирование некоторой спектральной области в течение импульса [16]. В ККЛ с внешним резонатором квантового каскадная структура служит в качестве активной среды лазера. Одна или обе грани волновода имеют антибликовое покрытие, которое предотвращает формирование резонатора между гранями кристалла. Зеркала потом встраиваются во внешний резонатор. На рис. 7 представлена схема ККЛ в конфигурации Литтрова (Littrow) с внешним резонатором, включающим дифракционную решетку [2].

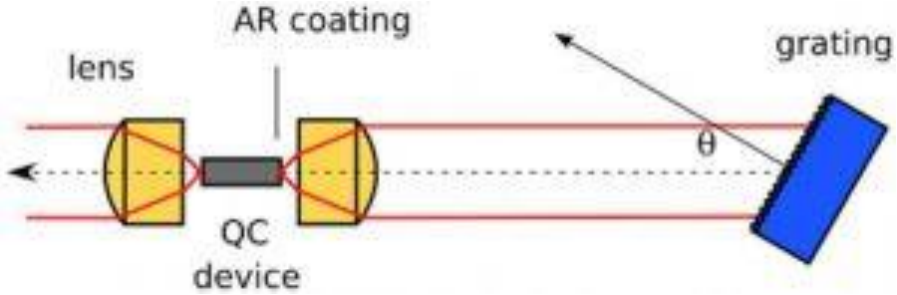



Рис. 7. Схема квантово-каскадного лазера в конфигурации Литтрова (Littrow) с внешним резонатором: lens – объектив, QC device – квантово-каскадный лазер, AR (anti-reflective) coating – антиотражающее покрытие, grating – дифракционная решетка

Если частотно-селективный элемент включен во внешний резонатор, то возможно получить одноволновую генерацию. Например, с использованием дифракционной решетки можно создать лазер, перестраиваемый более чем 15% от центральной длины волны генерации [16].

## Основные направления и перспективы развития ККЛ

В настоящее время разработка ККЛ ведется по следующим основным направлениям [2]:

– исследование физики внутризонных переходов в униполярных ККЛ на сверхрешетках;
– получение генерации на резонансной частоте в полупроводниковых квантоворазмерных гетероструктурах, излучающих одновременно две длины волны;
– исследование междузонной генерации в узкозонных гетероструктурах и физики биполярных структур ККЛ на сверхрешетках.

Важнейшие результаты разработки ККЛ [7]:

– изменение рабочей длины волны в широкой области спектра 2,7–24 мкм и 60–300 мкм;
– разработаны одномодовые с распределенной обратной связью (РОС) ККЛ с областью плавной перестройки длины волны 10–20 см$^{-1}$, а для ККЛ с внешним резонатором – до 170 см$^{-1}$; можно увеличить этот диапазон до 500 см$^{-1}$ в ККЛ со схемами с усилением уровней и в гетерогенных ККЛ;
– ширина линии излучения составляет менее 100 кГц в режиме свободной генерации и менее 10 кГц при стабилизации;
– униполярная природа ККЛ и эффекты каскадирования приводят к генерации большой мощности излучения при 300 К – более 1 Вт (до 3-5 Вт) в области спектра 4–10 мкм в непрерывном режиме и до 120 Вт в импульсном режиме при к.п.д., составляющем десятки процентов;
– высокая рабочая (до 400 К) и высокая характеристическая (до 500 К) температура;
– высокочастотная модуляция до 100 ГГц;

– возможность генерации коротких импульсов излучения ($t_и$=89 пс, частота 100 МГц) за счет короткого времени релаксации электронов и времени жизни фотонов в резонаторе (около 1–3 пс);
– самосинхронизация мод с частотой биений 13 ГГц;
– срок службы до 2,5 лет (при генерации излучения на длине волны 4,8 мкм).

Перспективы развития ККЛ [7]:

– повышение мощности излучения и к.п.д. – более 100 Вт в непрерывном и в импульсном режиме при комнатной температуре;
– к.л.д. при работе в непрерывном режиме свыше 30%;
– создание коротковолновых ККЛ для области спектра 2 – 4 мкм.

Для применения ККЛ в волоконно-оптических линиях связи требуется длина волны 1,5 мкм, для реализации которой нужно исследовать новые гетероструктуры с большой шириной запрещенной зоны (нитриды, соединения группы II – III), заполнение пробела 20–70 мкм в рабочем диапазоне длин волн ККЛ, повышение мощности излучения терагерцовых ККЛ и обеспечение их работы при термоэлектрическом охлаждении, создание КЛ на квантовых точках с низкой плотностью порогового тока (до 10 А/см$^2$) и высокой характеристической температурой – до 400 К.

## Основные применения ККЛ

Основные применения ККЛ [7]:

– спектроскопия (разрешение $\leq 10^{-4}$ см$^{-1}$);
– газоанализ (чувствительность ppm – ppb);
– медицина (дыхательная диагностики, диагностирование опухолей, ожогов и др.);
– гетеродинирование в ИК области спектра;
– интроскопия различных материалов;
– охрана;
– досмотр;
– военные применения (ИК подсвет, ИК буи и маяки);
– секретная связь в свободном пространстве без риска быть обнаруженным;
– ИК целеуказание и измерение дальности;
– тепловидение;
– создание глушителей для ракет с ИК наведением и прочих ИК помех;
– досмотр багажа и людей и др.

## Роль рабочей длины волны ИК лазера при распространении его излучения в атмосфере

С точки зрения влияния ослабления излучения в атмосфере на практике часто используется понятие метеорологической дальности видимости (МДВ) $S_M$ [30]:

$$S_M=(-\ln K_{пор})\ \alpha_\Sigma^{-1}, \quad (1)$$

где $K_{пор}$ – пороговый контраст объекта с фоном.

Метеорологическая дальность видимости – расстояние, на котором дальность видения черных объектов на фоне неба определяется только показателем ослабления.

Поскольку $K_{пор}$=0,02, то:

$$S_M = 3{,}91\alpha_\Sigma^{-1}. \quad (2)$$

В общем случае ослабление в оптически прозрачной среде можно выразить с помощью закона Бугера [30]:

$$\tau_a = \exp(-\alpha_\Sigma\, l), \quad (3)$$

где $\tau_а$ – пропускание атмосферы,

$\alpha_\Sigma$ – суммарный показатель ослабления, 1/км,

$l$ – длина трассы, км,

$$\alpha_\Sigma = \alpha_п + \alpha_{мр} + \alpha_{ар}, \quad (4)$$

где $\alpha_п$ – показатель поглощения, 1/км,

$\alpha_{мр}$ – показатель молекулярного рассеяния, 1/км,

$\alpha_{ар}$ – показатель аэрозольного рассеяния, 1/км.

В табл. 2 представлены объемные аэрозольные коэффициенты рассеяния $\alpha_{ар}$ для лазеров, излучающих на различных длинах волн в дымках, облаках, туманах и дождях [30].

Таблица 2 – Объемные аэрозольные коэффициенты рассеяния $\alpha_{ар}$ для лазеров, излучающих на различных длинах волн в дымках, облаках, туманах и дождях

| Длина волны, мкм | **0,63** | | | **0,69** | | | **0,84** | | | **1,06** | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Условия | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Дымка, $S_м$ = 10 км | 0,25 | 0,38 | 0,3 | 0,22 | 0,37 | 0,28 | 0,15 | 0,35 | 0,22 | 0,10 | 0,33 | 0,17 |
| Облако или туман, $S_м$ = 0,2 км | 16 | 21 | 19 | 16 | 20 | 20 | 15 | 20 | 19 | 17 | 22 | 20 |
| Дождь интенсивностью $J$ = 5 мм/час | 0,69 | | | 0,69 | | | 0,69 | | | 0,69 | | |
| Длина волны, мкм | **1,15** | | | **3,39** | | | **3,51** | | | **10,6** | | |
| Условия | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| Дымка, $S_м$ = 10 км | 0,08 | 0,33 | 0,16 | 0,03 | 0,26 | 0,08 | 0,02 | 0,25 | 0,07 | 0,01 | 0,06 | 0,02 |
| Облако или туман, $S_м$ = 0,2 км | 16 | 20 | 20 | 20 | 31 | 21 | 19 | 30 | 21 | 3,0 | 21 | 14 |
| Дождь интенсивностью $J$ = 5 мм/час | 0,69 | | | 0,69 | | | 0,69 | | | 0,69 | | |

Примечания:

1. Условия определяют величину $\alpha_{ар}$: 1 – минимальную, 2 – максимальную, 3 – наиболее вероятную.
2. Для дождя интенсивностью $J$ = 5 мм/час для всех длин волн $\alpha_{ар}$ = 0,69.
3. Приведенные в таблице значения $\alpha_{ар}$ для длин волн 0,63; 0,84; 1,06; 3,51 мкм одновременно являются и коэффициентами ослабления; для лазеров с другими длинами волн следует учесть еще и коэффициент поглощения.
4. В случае, если $S_м$ отличается от величин, приведенных в таблице, то значения $\alpha_\lambda$ следует умножить соответственно на коэффициенты 10/ $S_м$ и 0,2/ $S_м$, а для дождя с произвольной интенсивностью $J$ – на коэффициент $J$/5.
5. Прозрачность атмосферы для лазерного излучения рассчитывают по формуле 3, причем $\alpha_\Sigma=\alpha_{ар}+\alpha_п$, где $\alpha_п$ – коэффициент поглощения, км$^{-1}$; этот коэффициент берется из таблицы 3 [30]. Молекулярным рассеянием можно пренебречь.

Таблица 3 – Коэффициенты ослабления поглощения $\alpha_п$ для различных длин волн лазерного излучения

| Длина волны, мкм | 0,69 (минимум) | 0,69 (максимум) | 1,15 | 3,39 | 10,6 |
|---|---|---|---|---|---|
| $\alpha_п$ | 0,26 | 1,1 | 3,0 | 5,0 | 0,08 |

Примечание: данные табл. 3 приведены для влажности $a$=10 г/м$^3$, для другой влажности величины $\alpha_п$ таблицы следует умножить на $a$/10.

На рис. 8 представлена зависимость коэффициента ослабления лазерного излучения в атмосфере в ИК области спектра от ослабления в видимой области спектра для длин волн, мкм: 1–1,06; 2–1,44; 3–1,54; 4–2,1; 5–10,6 [30].

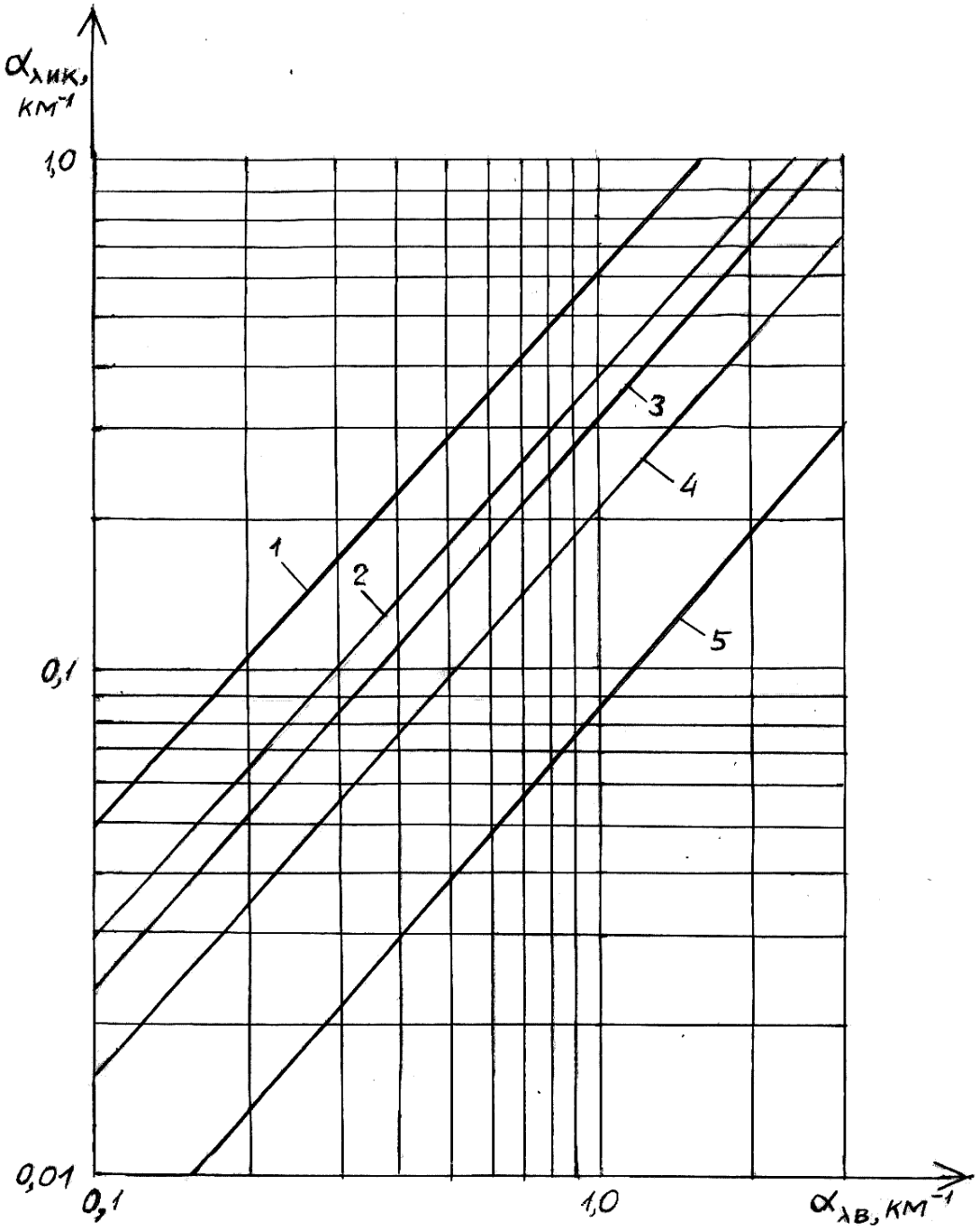



Рис. 8. Зависимость коэффициента ослабления $\alpha_{\lambda ИК}$ лазерного излучения в атмосфере в ИК области спектра от коэффициента ослабления $\alpha_{\lambda В}$ в видимой области спектра для длин волн, мкм: 1–1,06; 2–1,44; 3–1,54; 4–2,1; 5–10,6

Из рис. 8 и таблиц 2 и 3 видно преимущество перехода в более длинноволновую ИК область спектра. Это позволяет улучшить условия прохождения лазерного излучения в атмосфере, т.е. расширяется возможность работы оптико-электронных устройств при пониженной прозрачности атмосферы (дымка, туман, дождь, снегопад, пыльная или песчаная буря, дымы и др.).

## Применение ККЛ в стационарных и мобильных тепловизионных приборах для систем обеспечения безопасности

В связи с необходимостью работы в условиях пониженной прозрачности атмосферы в системах обеспечения безопасности получили большое распространение тепловизионные приборы (ТВП) наблюдения [30–34]. Они широко используются в системах охраны при работе со стационарных постов и методом патрулирования. ТВП работают в области спектра 3–5 и 8–14 мкм. Это позволяет им функционировать при пониженной прозрачности атмосферы. По тепловому излучению можно с помощью ТВП обнаружить злоумышленников, скрытых в листве кустарников и деревьев. Однако ТВП могут работать только при условии обеспечения достаточно высоких температурных контрастах объекта наблюдения с окружающим объект фоном. Если такой контраст ниже порогового значения, то ТВП теряют работоспособность. Применение дополнительного ИК лазерного осветителя, работающего в рабочей области спектра ТВП, позволяет при подсвете объекта резко повысить его температурный контраст по отношению к фону. Это позволяет обнаружить и распознать злоумышленника при наблюдении со стационарных и мобильных постов охраны. Для мобильных постов это также важно с точки зрения повышения безопасности вождения патрульных автомашин в ограниченных условиях видимости. В самом деле, если поперек дороги (или на пересеченной местности) лежит бревно или камень с низким температурным контрастом по отношению к фону, то возможен наезд и авария. На рис. 9 представлен типичный ТВП FLIR FC серии S для охраны со стационарного поста [33], а на рис. 10 – ТВП PathFindIR с патрульной автомашины [34].

Рис. 9. Типичный ТВП для охраны со стационарного поста

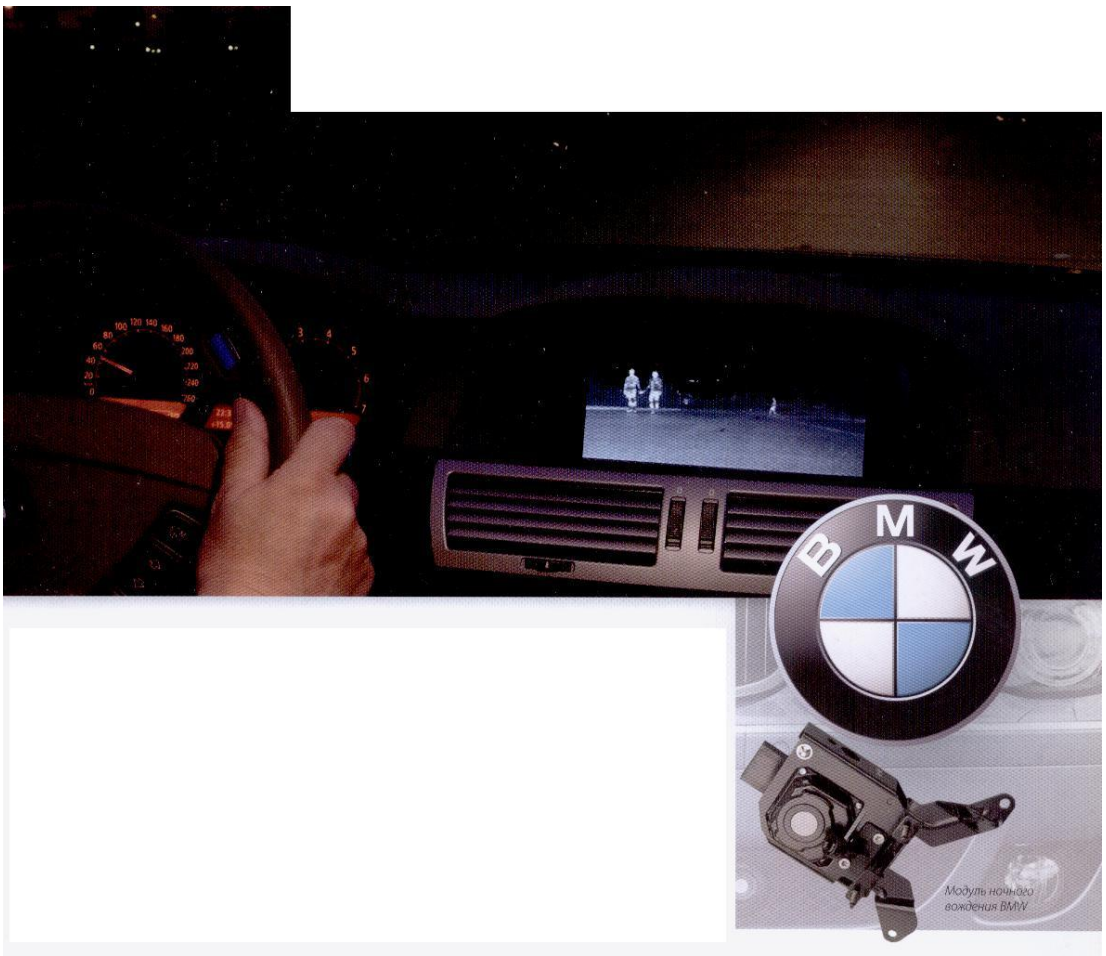



Рис. 10. Типичный ТВП для охраны с патрульной автомашины

ТВП FLIR FC серии S (рис. 9) [33] позволяет обнаружить нарушителей и другие угрозы для безопасности охраняемых объектов в полной темноте и при плохой погоде. В ТВП передача данных и питание осуществляются по одному кабелю. ТВП FLIR FC серии S может быть подключен к любой существующей сети TCP/IP для управления самых различных сетевых устройств, включая персональный компьютер, NVR, смартфон или планшет с использование программных продуктов FLIR или других производителей. С помощью этого ТВП можно следить за обстановкой по Интернету с любого расстояния. Каналы потокового цифрового видео доступны в форматах H.264, MPEG-4 или M-JPEC. ТВП выполнен на базе фокально-плоскостной неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей 640×480. ТВП работает в области спектра 7,5–13,5 мкм при температурной чувствительности менее 0,05 К, массе 1,8 кг, габаритах 259×114×106 мм, энергопотреблении 5 Вт при питании от = 24 В или 8 Вт при питании от ~ 24 В. Дальность распознавания ростовой фигуры человека (РФЧ) с характерным размером 1,8×0,5 м в нормированных условиях (нормальная прозрачность атмосферы $\tau_a \geq 0{,}8$, температурный контраст объекта с фоном $\Delta T = 0{,}5$ К) составляет 320 м, а транспортного средства (ТР) с характерным размером 2,3×2,3 м – 950 м. Угол поля зрения ТВП равен 18×14°. Расчет по методике работы [32] показывает, что при дополнительной установке ИК осветителя на базе ККЛ с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 0,2 Вт и углом подсвета 5×2,5°дальность

распознавания РФЧ в нормированных условиях сохраняется даже при $\Delta = 0{,}05$ К.

ТВП PathFindIR (рис. 10) [34] вождения патрульной автомашины также обеспечивает работу в полной темноте и в плохую погоду, делает невозможным ослепление водителя фарами встречных ТС. С помощью этого ТВП обнаружение большинства опасностей в 4 раза выше, чем с помощью обычных фар. ТВП выполнен на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей 320×240. Рабочая область спектра – 8–14 мкм. Угол поля зрения 24×18°. Масса ТВП 0,3 кг при габаритах 60×86×82 мм, а электронного блока управления – 0,35 кг и 148×110×24 мм соответственно. Энергопотребление составляет 2 Вт (6 Вт с включенным обогревателем) при питании от = 12 В. Расчет по методике работы [32] показывает, что при установке ИК осветителя на основе ККЛ с указанными выше параметрами вероятность обнаружения опасностей как при нормальной, так и при пониженной прозрачности атмосферы возрастает с $P = 0{,}5$ до $P = 0{,}8$ при вероятности пропусков и ложных тревог $P_{пр} = P_{лт} = 0{,}01$.

## Применение ККЛ в портативных тепловизионных приборах и приборных комплексах для систем обеспечения безопасности

Для охранников нередко используются тепловизионные ночные монокуляры (ТНМ) и псевдобинокулярные тепловизионные очки ночного видения (ТОНВ), которые можно удерживать в руке, но чаще всего они закрепляются на голове оператора с помощью регулируемого ременного оголовья либо на шлеме с помощью универсального крепления. Простым поворотом ТНМ или ТОНВ с последующей фиксацией можно осуществить их перевод из рабочего положения в нерабочее или наоборот.

Конкретным примером ТНМ может служить модель МТ-1 фирмы ООО «СОТ» (РФ) (рис. 11) [31]. ТНМ МТ-1 имеет дальность распознавания РФЧ в нормированных условиях 250–300 м, угол поля зрения 12×9°, увеличение 1 крат, температурное разрешение 0,05 К, рабочую область спектра 8–12 мкм, массу 0,4 кг, габариты 76×76×76 мм, энергопотребление не более 1,8 Вт при напряжении питания равном 6 В. МТ-1 выполнен на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей 160×120.

Конкретным примером ТОНВ может служить модель ITT-2 ЦКБ «Точприбор» (РФ) (рис. 12) [31]. ТОНВ ITT-2 имеют дальность распознавания РФЧ в нормированных условиях 300–350 м, угол поля зрения 22,6×17°, температурное разрешение 0,1 К, рабочую область спектра 7–14 мкм, массу 0,35 кг, габариты 52×75×120 мм, напряжение питания 6 В. ТОНВ ITT-2 выполнены на базе неохлаждаемой матрицы микроболометров с числом пикселей 384×288.

Для приборов МТ-1 и ITT-2 при работе «с руки» возможно применение дополнительного ИК осветителя на базе ККЛ с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 0,2 Вт, углом подсвета 8×4° и массой 0,08 кг позволяет как показывает расчет по методике работы [32], сохранить указанные выше дальности распознавания РФЧ при $\Delta T = 0{,}03$ К.

Рис. 11. Тепловизионный ночной монокуляр (ТНМ)

Рис. 12. Тепловизионные очки ночного видения (ТОНВ)

Для обеспечения работы бойцов спецподразделений необходим ночной универсальный прицельный комплекс. Он служит для ведения прицельной стрельбы из индивидуального стрелкового оружия, чтения карт, вождения ТС, ремонтных работ и др. в условиях низкой освещенности ночью и в сумерках. Его модель «Альфа-1962» ОАО «Швабе – Фотоприбор» [31] содержит ночной монокуляр (НМ) «Альфа-9022», лазерный целеуказатель (ЛЦУ) «Альфа-7115», ИК светодиодный осветитель (ИКСО) «Альфа-8111», афокальную оптическую насадку с увеличением 2,5 крат, устройство зарядное для зарядки аккумуляторов – источников первичного питания НМ, ИКСО, ЛЦУ от напряжения: 12 В; 27 В; ~220 В, 50 Гц. НМ «Альфа-9022» выполнен на основе электронно-оптического преобразователя, работающего в области спектра 0,4–0,9 мкм. НМ «Альфа-9022» крепится с помощью универсального крепления на защитном шлеме. Крепление допускает быстрый перевод НМ из рабочего положения в нерабочее и наоборот. НМ может также крепиться на голове любой формы с помощью оголовья с регулируемыми ремнями. НМ может использоваться и для работы «с руки». В этом случае он комплектуется ИК осветителем «Альфа-8111» на базе ИК светодиода с длиной волны 0,85 мкм и

имеет автономный источник питания. При работе в нормированных условиях ($\tau_a \geq 0{,}8$, уровень естественной ночной освещенности $3\times10^{-3}$ лк) дальность распознавания РФЧ в НМ составляет 200 м. В абсолютной темноте НМ совместно с ИКСО обеспечивает распознавание РФЧ на дальности до 100 м. При установке на объектив НМ афокальной оптической насадки дальность распознавания РФЧ в НМ увеличивается до 300 м при угле поля зрения 10°. НМ имеет регулируемую фокусировку и диоптрийную наводку, а также встроенный ИКСО для работы в закрытом помещении. Мощность излучения этого ИКСО равна 5 мВт при рабочей длине волны 0,85 мкм и угле подсвета 40°, а дальность действия – 10 м. НМ имеет угол поля зрения 40°, увеличение 1 крат, массу 0,35 кг, габариты 50×70×140 мм. ИКСО «Альфа-8111» имеет мощность излучения 20 мВт, рабочую длину волны 0,85 мкм, угол подсвета 8°, массу 0,075 кг, габариты Ø22×120 мм. ЛЦУ «Альфа-7115» монтируется на стрелковое оружие и служит для создания на цели светового пятна подсвета, наблюдаемого в НМ. ЛЦУ обеспечивает наблюдение пятна подсвета с постоянной во времени яркостью или мерцающего в зависимости от конкретных условий наблюдения. ЛУЦ выверен по отношению к оси оружия так, чтобы при стрельбе пули попадали в пятно подсвета. Достаточно придать оружию положение, при котором пятно подсвета совпадает с целью – и можно открывать огонь. ЛУЦ «Альфа-7115» имеет мощность излучения 2 мВт, угол подсвета 1,5', длину волны 0,82–0,85 мкм, массу 0,36 кг, габариты 120×110×42 мм. Напряжение питание всех устройств комплекса составляет 2,5-3 В (2 батареи АА-типа). Комплекс по своим техническим характеристикам находится на уровне лучших мировых образцов. Однако он имеет недостаток – невозможность работы при пониженной прозрачности атмосферы. Для устранения этого недостатка НМ «Альфа-9022» должен быть заменен на ТНМ, например, на ТМ-1. В ЛЦУ вместо традиционного инжекционного лазерного полупроводникового излучателя должен быть установлен ККЛ с длиной волны 10,3 мкм при массе ЛЦУ 0,3 кг. Вместо обычной оптики должен быть установлен германиевый ИК объектив. Мощность излучения ККД составляет 3 мВт при угле подсвета 1,5'. В этом случае дальность видения пятна подсвета, как показывает расчет по методике работ [30, 32], в ТНМ составляет 1500 м. ИК осветитель также должен быть выполнен на базе ККЛ с ИК оптикой из германия, с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 20 мВт, углом подсвета 8×4°, массой 0,11 кг. Как показывает расчет по методике работы [32], наличие осветителя на базе ККЛ позволяет сохранить дальность распознавания РФЧ при температурном контрасте 0,05 К. ТНМ должен иметь встроенный ИК осветитель на основе ККЛ с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 3–5 мВт и углом подсвета 20°. Его дальность действия, как показывает расчет по методике работы [32], составляет 10 м. при температурном контрасте 0,05 К.

Рис. 13. Универсальный ночной прицельный комплекс «Альфа-1962»

ЛЦУ может входить в состав комбинированного осветителя-целеуказателя, состоящего из ИК осветителя и собственно ЛЦУ. ИК осветитель служит для обеспечения работы НМ (ОНВ) в темноте, а ЛЦУ – для прицеливания из любого положения оружия. Конкретным примером такого прибора является светодиодный осветитель-целеуказатель «2ИКС-КЛЕЩ + ЛЦУ» с режимом стробоскопа (рис. 14) [35]. Источник света в ИК осветителе - модуль полупроводникового сверх яркого светодиода ИК-диапазона с дальностью не менее 150 метров. ЛЦУ ИК-диапазона имеет длину волны 0,85 мкм и эффективную дальность в темное время суток – 1500 метров. Электропитание осуществляется от двух элементов CR123 с номинальным напряжением 3 В, либо от 4-х никель-кадмиевых аккумуляторов. Время непрерывной работы со стабильным световым потоком от штатных элементов питания (режим постоянного включения) не менее 3 часов. Габаритные размеры: 73×36×46 мм. Масса изделия без элементов питания – не более 165 г. Наличие режима стробоскопа как ИК осветителя, так и ЛЦУ. Возможность дополнительно включить ИК осветитель при уже работающем ЛЦУ. Имеется наличие индикации работы ИК осветителя и ЛЦУ.

Для обеспечения работы данного прибора при пониженной прозрачности атмосферы в нем, как и в комплексе «Альфа-1962», должен быть вместо ИК светодиода и ИК лазерного диода введен ККЛ с длиной волны 10,3 мкм и массой 0,3 кг. Вместо обычной оптики должен быть установлен германиевый ИК объектив. Мощность излучения ККД составляет 3 мВт при угле подсвета 1,5'. В этом случае дальность видения пятна подсвета в ТНМ составляет 1500 м (по расчету по методике работы [36]). ИК осветитель также должен быть выполнен на базе ККЛ с ИК оптикой из германия, с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения 20 мВт, углом подсвета 8×4°, массой 0,11 кг. Наличие

осветителя на базе ККЛ позволяет, как показывает расчет по методике работы [32], сохранить прежнюю дальность распознавания РФЧ при температурном контрасте 0,05 К.

Рис. 14. Комбинированый осветитель-целеуказатель 2ИКС-КЛЕЩ + ЛЦУ

Такой же ЛЦУ может быть использован для обеспечения посадки вертолета на необходимую площадку при пониженной прозрачности атмосферы. Для этого ЛЦУ, надетый на палец, указывает место посадки, создавая на нем пятно подсвета (рис.15) [30]. При этом оператор, работающий с ЛЦУ, должен иметь ТНМ или ТОНВ, а пилот вертолета – ТОНВ.

Рис. 15. ЛЦУ, надетый на палец, служащий для указания места посадки вертолета в ограниченных условиях видения

## Применение ККЛ в лазерных приборах для измерения дальности и скорости

Для систем безопасности, в том числе для обеспечения безопасности дорожного движения в интересах ГИБДД, используются портативные лазерные дальномеры (ЛД) и измерители скорости. Они выполнены на основе полупроводниковых лазеров, излучающих на длине волны 0,85, 0,9 или 1,55 мкм. ЛД состоят из дневного оптического визира со встроенным фотодиодом для приема лазерного излучения, отраженного от цели, а также из канала лазерного излучателя. В частности, ЛД LRM 2000 (совместное производство канадской фирмы Newcon Optic и ОАО «Швабе-Фотоприбор») (рис. 16) [36], выполненный на основе полупроводникового лазера с длиной волны 0,905 мкм. ЛД измеряет дальность от 20 до 2000 м с точностью ± 1 м, имеет массу 0,45 кг, габариты 120×123×78 мм, напряжение питания = 9 В. Дневной визир имеет увеличение 7 крат и угол поля зрения 8,2°. ЛД имеет встроенную допплеровскую систему измерения скорости, обеспечивающую ее контроль от 5 до 400 км/ч при точности ±1 км/ч. Недостаток ЛД - его неспособность работать в темное время суток и при пониженной прозрачности атмосферы. Для устранения этого недостатка вместо дневного визира рекомендуется установить ТВП с рабочей областью спектра 8–12 мкм, с увеличением 7 крат и углом поля зрения 8×6°. При этом достигается круглосуточная и всепогодная работа, а также возможность видения при воздействии излучения мощных автомобильных фар. Вместо лазерного излучателя с длиной волны 0,905 мкм должен быть установлен ККЛ с длиной волны 10,3 мкм, мощностью излучения в импульсе 5 Вт и угловой расходимостью излучения 1'. При этом, как показывают расчеты по методике работы [30, 32], указанный выше диапазон измерения дальности сохраняется и при пониженной прозрачности атмосферы, а также ночью.

Рис. 16. Портативный лазерный дальномер.

ЛД входит в состав многоканальной системы круглосуточного и всепогодного наблюдения. Примером такой системы может служить система серии HRC Multi-Sensor System (фирма FLIR Systems, США) (рис. 17) [37]. Система предназначена для охраны границ и береговой линии на больших расстояниях. Система может быть выполнена в различных конструктивных конфигурациях. В частности, возможно объединение в конфигурацию ТВП

HRC-X, дневной длиннофокусной ТВ камеры LR-TV, ЛД, GPS, цифрового магнитного компаса, TCP/IP, надежного опорно-поворотного устройства. В нормированных условиях ТВП HRC-X обеспечивает дальность обнаружения РФЧ (1,8×0,5 м) 17,5 км, распознавания – 9,2 км, идентификации – 5,3 км. В тех же условиях HRC-X обеспечивает дальность обнаружения ТС (2,3×2,3 м) 21,6 км, распознавания – 15,1 км, идентификации – 10,5 км. При этом вариообъектив позволяет менять угол поля зрения от 0,5×0,38° (для указанных максимальных дальностей действия) до 6,3×4,7°. ТВП выполнен на базе матричных фотодетекторов на основе InSb или CdHgTe с числом пикселей 64×480 или 640×512. Рабочая область спектра 3–5 мкм. Масса ТВП составляет 12 кг, габариты 564×264×303 мм, энергопотребление 35 Вт (125 Вт с нагревателем) при напряжении питания = 24±4 В.

Рис. 17. Многоканальный комплекс круглосуточного и всепогодного наблюдения

Системы ЛД на (основе активной среды Er + стекло) с длиной волны 1,54 мкм обеспечивает измерение дальности от 80 до 20000 м с точностью ± 5 м. Его энергопотребление не превышает 5 Вт при том же напряжении питания, масса составляет 3,5 кг.

Дневная ТВ камера LR-TV выполнена на основе матрицы ПЗС формата ½ дюйма, работающей в области спектра 0,4–1,1 мкм. Фокусное расстояние объектива камеры меняется от 12,5 мм до 750 мм (при наличии экстендера с увеличением 2 крат – от 25 мм до 1500 мм). При этом угол поля зрения составляет соответственно 0,48°–28,7° (при наличии экстендера – 0,24°–14,4°), минимальная рабочая освещенность 0,02–0,06 лк, масса 10,5 кг при том же напряжении питания.

Опорно-поворотное устройство обеспечивает программируемый поиск и вращение системы по азимуту n×360° со скоростью вращения 0,03–65 град/с, по углу места цели ±35° со скоростью вращения 0,03–30 град/с. Точность устройства составляет 1 мрад, разрешение – 0,1 мрад. Энергопотребление всей системы составляет 55–140 Вт (350 Вт с нагревателем), масса – не более 65 кг.

В данной системе применение ИК осветителя на основе ККЛ с длиной волны 3,9 мкм при мощности его излучения 0,5 Вт, угле подсвета 1×0,5°, массе 5 кг, как показывают расчеты по методике работы [32], создается возможность сохранение указанных выше дальностей действия при $\Delta T$ = 0,05 К.

Применение в ЛД ККЛ вместо активной среды Er + стекло позволяет визуализировать излучение ЛД. При этом ЛД на базе ККЛ будет иметь длину волны 3,9 мкм и мощность излучения в импульсе 200 Вт при частоте 3 Гц. При этом ЛД с длиной волны 3,9 мкм может более эффективно работать при пониженной прозрачности атмосферы по сравнению с длиной волны 1,54 мкм.

Для обеспечения безопасности вождения транспортных средств ГИБДД используют лазерные измерители скорости. В частности, применяется мобильный лазерный измеритель скорости «Луч-М» (рис. 18) [38] с автоматической фоторегистрации факта нарушения скоростного режима и идентификацией ТС. Узконаправленное лазерное излучение исключает измерение скорости двух и более ТС в потоке автомобилей. Информация с датчика передается по Wi-Fi на расстояние до 1 км на удаленный пост. «Луч-М» может работать в любое время суток. Рабочая длина волны – 0,905 мкм, диапазон измерения скорости 0–250 км/ч, дальности 50–300 м, дальности, на которой обеспечивается читаемость государственных регистрационных знаков 80–200 м, среднеквадратическая погрешность измерения скорости 0,7 км/ч, дальности ± (0,3 + 0,001 $D$) м, где $D$ – дальность. Угол расходимости лазерного излучения составляет 0,003×0,003 рад, напряжение питания = 10–14 В. Недостаток прибора – невозможность работы при пониженной прозрачности атмосферы и при воздействии излучения встречных автомобильных фар. Для устранения этого недостатка рекомендуется введение тех же устройств, что и для ЛД LRM 2000.

## Применение ККЛ в системах досмотра

Выше уже говорилось об эффективности применения терагерцового диапазона излучения для досмотра (рис. 19) [12]. Дополнительное использование в такой системе ККЛ, работающего в области спектра до 300 мкм, позволит существенно повысить чувствительность системы. Для системы досмотра на основе Т-лучей использование ККЛ с мощностью излучения до 5 Вт позволит создать не только стационарную, но мобильную и переносную систему досмотра. Поскольку Т-лучи проникают не только сквозь одежду и тело человека, но и другие вещества. Это существенно повышает эффективность досмотра.

Рис. 18. Лазерный измеритель скорости «Луч-М»

Рис.19. Досмотр в терагерцовом диапазоне спектра

## Применение ККЛ в лазерных атмосферных линиях связи

Кроме радиотехнических и волоконно-оптических линий связи в современной технике также получили распространение лазерные атмосферные линии связи. Такая беспроводная оптическая связь более эффективна при ее использовании в охранных системах и других системах обеспечения безопасности, позволяя достигнуть высокой скорости передачи, скрытности канала связи и его недоступность в части определения вида связи. Такая система позволяет организовать канал связи между территориально удаленными сегментами локальной сети (например, соединение отдельно стоящих корпусов предприятия, складских помещений, студенческих городков, объединение локальных сетей банков, медицинских учреждений и др.). Оборудование позволяет с минимальными затратами организовать канал связи через реки и прочие водоемы, железные дороги, автомагистрали, горные районы (ущелья), частные территории и другие участки местности, где прокладка кабельных соединений невозможна или затруднена. Примером лазерной атмосферной системы связи может служить модель M1FE-R, работающая на дальности 1500–7000 м со скоростью передачи информации 131 Мбит/с [39]. Длина волны оптического лазерного канала составляет 0,785 мкм. Бюджет линии на дистанции 1 км составляет 33 дБ, время задержки в оптическом канала менее 0,125 мс, дальность связи при доступности 0,9999 – до 7000 м, частота резервного радиорелейного канала 5,8 ГГц, скорость передачи в резервном канале до 20 Мбит/с, время задержки 5–300 мс. Способ поддержания направления связи – автоматическое наведение, диапазон отработки углов отклонения 50/3 мрад/град, энергопотребление 38 Вт при напряжении питания ~ 90–260 В или = (48 ± 15%) В. Масса, кг/габариты, мм оптического блока 13/555×475×225, интерфейсного блока 2,5/450×280×40, радиоблока 3/300×300×50, длина кабеля менее 100 м. В данной системе автоматическая наводка приемо-передающих модулей друг на друга в процессе настройки и эксплуатации беспроводного канала связи осуществляется с точностью 0,08 мрад. Это повышает бюджет лазерной атмосферной линии связи (что особенно важно на дистанциях более 500 м), увеличивает надежность беспроводного канала, одновременно снижая требования к стабильности опоры и обслуживающего оборудования. Предусмотрена защита от солнечной засветки и автоматическая регулировка мощности лазерного излучателя, что увеличивает ресурс системы до $10^5$ часов. Аэродинамический защитный кожух защищает блоки системы от перегрева или препятствует набиванию снега в передающие и приемные объективы. Недостаток лазерной системы – резкое падение дальности действия при ухудшении прозрачности атмосферы. В связи с этим замена лазерного излучателя с длиной волны 0,785 мкм на ККЛ с длиной волны 10,3 мкм при его мощности излучения 0,2 Вт позволит обеспечить работу системы и при пониженной прозрачности атмосферы без снижения дальности действия. В приемной части системы, как и во всех подобных устройствах с применение ККЛ, должно быть установлено фотоприемное устройство (на базе CdHgTe или микроболометров), чувствительное к длине волны ККЛ.

Современные атмосферные системы связи (рис. 20) работают на длинах волн 0,785, 0,83 или 1,55 мкм.

Рис. 20. Лазерная атмосферная система связи

Переход к использованию в таких системах ККЛ работающего на длине волны 10,6 мкм, как показывают расчеты по методике работы [30], позволит использовать такую систему связи круглосуточно и в условиях пониженной прозрачности атмосферы.

## Заключение

Приведенные примеры не охватывают, конечно, всех направлений использования ККЛ в системах обеспечения безопасности и связи. Однако они наглядно характеризуют возможности ККЛ с точки зрения создания систем круглосуточного и всепогодного действия.

**Приложение 1.**

Таблица 1 – Основные параметры типичных ККЛ

| № п/п | Рабочая длина волны, мкм | Мощность излучения, Вт, в непрерывном/ импульсном режиме | Рабочая температура | Пороговая плотность тока, кА/см$^2$ | Рабочий ток, А | Рабочее напряжение, В | Размеры излучателя (ширина тела свечения, мкм, длина резонатора, мм) | К.П.Д. (Эффективность), % | Источник информации, примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | ~ 4,4 | -/2,1 | 30ºС | | 6 | 10 - 20 | | | [10] фирма Alpen Lasers |
| 2 | 4,3 | -/2,1 | 78 К | | 6 | 10 - 30 | | | -«- |
| 3 | 4,47 | -/2,1 | 300 К | | 6 | 30 | | | -«- |
| 4 | 5,2 | -/3.1 | 190 К | | До 2 | До 30 | | | -«- |
| 5 | 5 | -/5 | 280 к | | | | | До 33 | -«- |
| 6 | 6 | >1,1/- | 200 К | | | | | | [10] фирма Illinoic M |
| 7 | 6 | 0,64/- | 295 К | | | | | (65) | [10] фирма Razagtu |
| 8 | 6 | 0,17/- | 15ºС | | 1,5 | 1,5 | | | [10] фирма Razagtu |
| 9 | 8,4 | 0,204/- | 300 К | | 0,9 | | | | [10] фирма Harvard + Agilent (США) |
| 10 | 4,8 | 0,038 (60ºС)/-<br>0,17 (15ºС)/- | До 60ºС | 1,1 | До 0,8 | До 12 | | 1,5 | [10] РОС ККЛ |
| 11 | 4,57 | 0,02/- | 10 - 20ºС | | 1 | | | | [19] Фирма ЮЕ Интернейшнл, диапазон перестройки ±1 см$^{-1}$ |
| 12 | 7,73 | 0,02/- | 10 - 20ºС | | 1 | | | | [19] |
| 13 | 7,82 | 0,02/- | 10 - 20ºС | | 1 | | | | [19] |
| 14 | 7,1 | 1,4/1,2 | 293 К | | 2,3 | 12,3 | | 10 (нр)<br>19 (ир) | [20], $t_и$ = 500 нс |
| 15 | 14 | -/0,336<br>-/0,13<br>-/0,06 | 300 К<br>80 К<br>300 К | 2 | | | | 20 ($t_и$ = 1 мкс, $F$ = 200 кГц)<br>5 ($t_и$ = 0,5 мкс, $F$ = 100 кГц) | [21] $t_и$ = 500 нс |
| 16 | ~4,55 | 0,01 – 0,02/- | 128 – 303 К | | 0,11 – 0,18 | 15 | | | [22] $F$ = 100Гц |
| 17 | 4,7 – 5,6<br>7,3 | 0,015/-<br>0,32/- | 48 - 60ºС<br>25ºС | 1 | 1 | | 10; 1 | | [23] |
| 18 | 10,3 | -/0,6 | 300 К | | До 4 | 12 | | | [24] $t_и$ = 160 нс |
| 19 | 4,7 | -/4,5 | 283 К | | До 1,8 | 14 | 7,5; 3 | | [25] срок службы 2x10$^3$ часов |
| 20 | 7,26 | 1,5/- | 300 К | | До 3,5 | | | | [26] $\theta_1$=17,6º, $\theta_2$=25,6º |
| 21 | 105,3 – 114,6 | -/0,028 | 200 К | 1 | До 1,6 | | | | [27] F = 2,6 – 2,85 ТГц |
| 22 | 14 | 0,366 | 300 К<br>(190 – 310 К) | 2 | | | -; 2,8 | | [9] 6 КЯ, 70 каскадов, |
| 23 | 4,9 | -/16 | 298 К | | 3,3 | 16 | | 27 | [9] 70 каскадов |
| 24 | 4,6 | -/14,5 | 300 К | | 2 | 10 | | | [9] |

| № п/п | Рабочая длина волны, мкм | Мощность излучения, Вт, в непрерывном/ импульсном режиме | Рабочая температура | Пороговая плотность тока, кА/см$^2$ | Рабочий ток, А | Рабочее напряжение, В | Размеры излучателя (ширина тела свечения, мкм, длина резонатора, мм) | К.П.Д. (Эффективность), % | Источник информации, примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 25 | 9 | -/4,5, -/2 | 300 К | | | 100 | 10; 3 | 16 (70)<br>10 | [9] |
| 26 | 4,9 | 5,1/- | 383 (298 – 373) К | | | | 8; 5 | 21 (нр)<br>27 (ир) | [9] |
| 27 | 4,45 | -/120 | 298 К | | | | 400, 3 | | [9] $t_и$ = 200 нс |
| 28 | 4,6<br>9 | 7,3/-<br>2/- | 80 К<br>300 К | | | | 12,5; 5 | 30 | [9] |
| 29 | 4,8 | 2,4/- | 298 К | | | 1 – 1,7 | 8; 5 | > 50 | [9] перестройка в диапазоне 2084 – 2088 см$^{-1}$ |
| 30 | ~ 4,5 | | ≤ 100 К | | | | 14; 3 | 40 - 50 | [9] 43 каскада |
| 31 | ~ 5 | | 40 К | | | | 6; 2 | 53 | [9] 80 каскадов |
| 32 | 2,6 | 0,26/- | 80 К | 5,5 | | | | | [9] InAs/AlSb на подложке InAs |
| 33 | 3,1 | 0,12/- | 80 К | 3,5 | | | | | [9] Композиция КЯ и барьера $In_{0,73}Ga_{0,27}$/AlAs(sb)/InP |
| 34 | 3,3 | -/3,5 | 300 К | 3,5 | | | | | [9] $In_{0,73}Ga_{0,27}$/AlAs(sb)/InP,<br>[9] Без Sb, но с AlAs!<br>$In_{0,72}Ga_{0,28}As/In_{0,52}Al_{0,08}As$-AlAs/InSb |
| 35 | 3,6 | 0,05/0,05 | 266 К | | | | | | [9] 35 каскадов, $t_и$ = 300 нс |
| 36 | 4,0 | 0,75/2,18 | 290 К | | | | 8,7; 3,65 | 5 (нр)<br>10,5 (ир) | [9] 40 каскадов, $t_и$ = 500 нс |
| 37 | 4,6 | 2/1,2<br>4,5/3 | 292 К | | | | 0,5; 3,5 или 15; 5 | 13 (нр)<br>15,4 (ир) | [9] |
| 38 | 8,7 | 0,1/1 | 300 К (до 500 К) | 2 | 0,85 | | | | [9] с внешним резонатором, 5 КЯ, 40 каскадов |
| 39 | 4,8 | 0,2 – 0,3/- | 300 К | | | | 11; 3 | | [9] срок службы 21000 часов (2,4 года!) |
| 40 | 4,6 | 2,1/- | 298 К | | | | 11; 3 | | [9] срок службы 3560 часов |
| 41 | 4,6 | 7,3/- | 80 К | | | | 12,5; 5 | 30 | [9] срок службы сотни часов |
| 42 | 4,6<br>9,6 | 2-3/0,1<br>-/0,02 | 293 К | | | | 15; 5 | 10 | [9] |
| 43 | 4,6 | -/0,2 (средняя мощность излучения) | | | До 20 | | | 5 | [9] $t_и$ = 50 нс – 5 мкс, $F$< 5 МГц |
| 44 | 60 - 250 | 0,008 – 0,056/- | 5 – 200 К | | | | | | [9] 1,2 – 5 ТГц |
| 45 | 70 | 0,008 – 0,056/- | 248 К | | | | | | [9] 4,7 ТГц |

| № п/п | Рабочая длина волны, мкм | Мощность излучения, Вт, в непрерывном/ импульсном режиме | Рабочая температура | Пороговая плотность тока, кА/см$^2$ | Рабочий ток, А | Рабочее напряжение, В | Размеры излучателя (ширина тела свечения, мкм, длина резонатора, мм) | К.П.Д. (Эффективность), % | Источник информации, примечание |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 46 | 70 | 0,0004 – 0,012 | 5 – 117 К | | | | | | [9] 3 ТГц |
| 47 | 75 - 300 | 0,00002 – 0,0013 | 4 – 20 К | | | | | | [9] 1 – 4 ТГц |
| 48 | 3 – 3,6 | -/4<br>1,1/-<br>0,01/- | 217 К<br>78 К<br>300 К | | | | | 21 | [9] |
| 49 | 3,6 – 3,9 | 0,29/- | 300 К | | | | | 15 | [9] |
| 50 | 2,6 | -/0,26 | 80 К | | | | | | [9] $t_и$ = 100 нс, 7 КЯ, $F$ = 10 кГц |
| 51 | 5,2 | -/200 | (-20) – (+50)ºС | | | | | | [28] фирма Азимут Фотоник, РОС ККЛ |
| 52 | 10,3 | -/100 | (-20) – (+50)ºС | | | | | | -«- |
| 53 | 12,5 | -/10 | (-20) – (+50)ºС | | | | | | -«- |
| 54 | 13,4 | -/80 | (-20) – (+50)ºС | | | | | | -«- |
| 55 | 4,57 | 0,02/- | (-10) – (+50)ºС | 1 | | | | | [29] фирма Hamamatsu Photonics K.K., размеры ККЛ 44,5x31,8x17,8 мм |
| 56 | 5,26 | -«- | -«- | 1 | | | | | -«- |
| 57 | 6,13 | -«- | -«- | 1 | | | | | -«- |
| 58 | 7,93 | -«- | -«- | 1 | | | | | -«- |
| 59 | 4,48 | -/0,05 | -«- | | | | | | [29] размеры ККЛ Ø15,3x23,8 мм, $t_и$ = 10 нс, $F$ = 200 кГц при +20ºС |
| 60 | 5,26 | -«- | -«- | | | | | | -«- |
| 61 | 6,13 | -«- | -«- | | | | | | -«- |
| 62 | 7,82 | -«- | -«- | | | | | | -«- |
| 63 | 5,263 | 0,015/- | | | | 1,5 | 7; 2 | 7, 1,2 | [12] $\theta_1$ = 30º, $\theta_2$ = 60º |
| 65 | 5,2 | | (-20)-(+50)ºС | | | | | | [12] $\theta_1$ = 30º, $\theta_2$ = 55º |
| 66 | 5,2 | 0,2/- | -«- | | | | | | -«- |
| 67 | 10,3 | 0,1/- | 0-(+30)ºС | | 2,5 | 12 | 10x15 мкм | | -«- |
| 68 | 10,3 | 0,003/- | -«- | | -«- | -«- | | | -«- |
| 69 | 12,5 | 0,01/- | -«- | | -«- | -«- | | | -«- |
| 70 | 13,4 | 0,08/- | (-20)-(+50)ºС | | -«- | -«- | | | -«- |

Примечания: $t_и$ – длительность импульса излучения, $F$ – частота следования импульсов, $\theta_1$ – угловая расходимость излучения в плоскости p–n перехода, $\theta_2$ - угловая расходимость излучения в плоскости, перпендикулярной p–n переходу., нр –непрерывный режим, ир – импульсный режим.

## Литература

1. Квантово-каскадные лазеры // Мастерская своего дела [Электронный ресурс] – URL: http://www.msd.com.ua/principy-lazerov/kvantovo-kaskadnye-lazery (дата обращения 02.12.15).

2. Квантово-каскадные лазеры. Перевод Малахова П. // Научно-образовательный проект "Лазерный портал" [Электронный ресурс] – URL: http://www.laserportal.ru/content_726 (дата обращения 02.012.15).

3. Бараш Л. Создан самый мощный терагерцовый квантовый каскадный лазер. – URL: http://ko.com.ua/sozdan_samyj_moshhnyj_teragercevyj_kvantovyj_kaskadnyj_lazer_104224 (дата обращения 02.012.15).

4. Исследователи из Принстона открыли новый тип лазерной генерации // Nanotechnology News Network [Электронный ресурс] – URL: http://www.nanonewsnet.ru/articles/2008/issledovateli-iz-prinstona-otkryli-novyi-tip-lazernoi-generatsii (дата обращения 02.12.15).

5. Ученые смогли создать 1-Вт квантово-каскадный лазер терагерцового диапазона // Overclockers [Электронный ресурс] URL: http://www.overclockers.ru/hardnews/58916/Uchenye_smogli_sozdat_1-Vt_kvantovo-kaskadnyj_lazer_teragercevogo_diapazona.html (дата обращения 05.05.15).

6. Создан квантовый каскадный лазер с рекордной эффективностью энергопреобразования // Компьютерра [Электронный ресурс] – URL: http://compulenta.computerra.ru/archive/applied_research/494202/ (дата обращения 02.12.15).

7. Засавицкий И. И. Рекордные характеристики квантовых каскадных лазеров // Общероссийский семинар по ДЛС 31 октября 2012 Москва. – URL: http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ДЛС-18.pdf (дата обращения 02.12.15).

8. Засавицкий И.И. Достижения в области квантовых каскадных лазеров (ККЛ) и их применений // Международная конференция "Радиационная физика твердого тела" им. П.Н. Лебедева РАН – URL: http://www.dls.gpi.ru/rus/sem/6/KKL_DLS2006RUS.pdf (дата обращения 07.07.15).

9. Демиховский В. Я. Квантовые ямы, нити, точки. Что это такое? // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 5. С. 80-86 – URL: http://stat.phys.spbu.ru/Metod/Kvantovie_jami.pdf (дата обращения 02.012.15).

10. Квантово-каскадный лазер перевернул все представления физиков // Hi-Tech Mail.ru [Электронный ресурс] – URL: https://hi-tech.mail.ru/review/kvantovo_kaskadnyy_lazer_perevernul_vse_predstavleniya_fizikov/ (дата обращения 02.12.15).

11. Ластовкин А. А. Квантово-каскадные лазеры. ИФМ РАН // MyShared [Электронный ресурс] – URL: http://www.myshared.ru/slide/175045/ (дата обращения 10.07.15).

12. Андронов А. А., Захаров Н. Г., Маругин Д. В., Савикин А. П. Новые источники и приемники ИК и терагерцового диапазона // Нижегородский

государственный университет им. Н.И. Лобачевского. Нижний Новгород. 2007. 95 с. URL: http://www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/27.pdf (дата обращения: 02.12.15).

13. Терагерцовый перестраиваемый лазер – новый тип химического анализатора // DailyTechInfo [Электронный ресурс] – URL: http://www.dailytechinfo.org/news/829-teragercovyj-perestraivaemyj-lazer-novyj-tip.html (дата обращения 02.12.15

14. Вакс В. Л., Домрачева Е. Г., Приползин С. И., Собакинская Е. А., Черняева М. Б. Прецизионные спектрометры на основе квантово-каскадных лазеров. Проблемы и возможные пути их решения // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 6(1). С. 93–98.

15. Коэф Й, Фишер М., Легге М., Сейферт Й., Вернер Р. Лазеры с распределенными брэгговскими решетками на квантовых ямах, точках и с квантовыми каскадами // Фотоника. 2008. № 4. С. 12–16.

16. Различные типы квантово-каскадных лазеров // Научно-образовательный проект "Лазерный портал" [Электронный ресурс] – URL: http://www.laserportal.ru/content_731 (дата обращения 09.12.15).

17. Квантово-каскадные лазеры позволяют детально рассмотреть нанообъекты // pcwork.ru Компьютерные системы [Электронный ресурс] – URL: http://www.pcwork.ru/kvantovyie_lazeryi_pozvolyayut_detalno_rassmotret_nanoobektyi.htm (дата обращения 02.12.15).

18. Maulini R., Lyakh A., Tsekoun A., Kumar C., Patel N. λ~7.1 μm quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature // Optics Express, 2011. Vol. 19. № 18. pp. 17203–17211.

19. Xue Huang, Charles W.O., Gmachi C. Temperature-intensitive long-wavelength (λ≈14 μm) Quantum Cascade Lasers with low threshold // Optics Express. 2011. Vol. 19. № 9. pp. 8297–8302.

20. Xue Huang, Chiu Y., Charles W.O., Gmachi C. Ridge-width depencende of the threshold of long wavelength (λ≈14 μm) quantum cascade lasers with sloped and vertical sidewalls // Optics Express. 2012. Vol. 20. № 3. pp. 2539–2547.

21. Bewley W. W., Canedy C. I., Kim C. S. Continous-wave interband cascade lasers operating above room temperature at λ=4.7–5.6 μm // Optics Express. 2012. Vol. 20. № 3. pp. 3235–3240.

22. Fuchs P., Friedl J., Höfling S. Single mode quantum cascade lasers with shollow-etched distributed Bragg reflector // Optics Express. 2012. Vol. 20. № 4. pp. 3890–3897.

23. Lyakh A., Maulini R., Tsekovn A. Tapered 4.7 μm quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 4.5 watts of continuous wave optical power // Optics Express, 2012. Vol. 20. № 4. pp. 4382–4388.

24. Menzel S., Diehl L., Pflűgel C. Quantum cascade laser master-oscillator power-amplifier with 1.5 W output power at 300 K // Optics Express. 2011. Vol. 19. № 17. pp. 16229–16235.

25. Fathololoum S., Dupurt E., Chan C.W.I. at all. Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injection tunneling // Optics Express. 2012. Vol. 20. № 4. pp. 3866–3876.

26. Quantum Cascade Laser.Каталог фирмы Frankfurt Laser Co. Германия. 2015. URL: http://www.frlaserco.com (дата обращения 20.09.15).

27. Квантово-каскадные лазерные диоды. Каталог компании Азимут Фотоникс. Оптоэлектронные компоненты. Российская Федерация. М., 2015.

28. Квантово-каскадные лазеры. Quantum Cascade Laser. Каталог фирмы Hamamatsu Photonics K.K. Япония, 2015.

29. Квантово-каскадные лазеры. Каталог фирмы WLaser Co. 2015. URL: http://www.wlaser.ru/diode (дата обращения 09.10.15).

30. Гейхман И. Л., Волков В. Г. Видение и безопасность. - М.: Новости, 2009. – 850 с.

31. Волков В. Г., Гиндин П. Д. Техническое зрение. Инновации. – М.: Техносфера, 2014. – 850 с.

32. Алеев Р. М., Иванов В. П., Овсянников В. А. Несканирующие тепловизионные приборы. Основы теории и расчета. – Казань: Издательство Казанского университета, 2004. – 228 с.

33. Тепловизионные камеры в системах обеспечения безопасности. Каталог фирмы FLIR Systems.США. 2015.

34. Автомобильная система ночного видения PathFundIR II. Проспект фирмы Пергам. 2015.

35. Комбинированый осветитель-целеуказатель 2ИКС-КЛЕЩ + ЛЦУ. Проспект компании «Зенит». 2015.

36. Лазерный дальномер LRM 2000. Проспект ОАО «Швабе-Фотоприбор». 2014.

37. Тепловизионные камеры, обеспечивающие наблюдение границ и береговой линии на больших расстояниях. Каталог фирмы FLIR Systems. США.

38. Лазерный измеритель скорости «Луч-М». Проспект ОАО «НИИ «Полюс» им. М. Ф. Стельмаха ОАО «Швабе». 2015.

39. Атмосферные оптические линии передачи данных FSO (Free Space Optics). Проспект Государственного рязанского приборостроительного завода. РФ. Рязань, 2014.

## References

1. Kvantovo-kaskadnye lasery. [Quantum-Cascade lasers] *Masterskaia svoego dela* [Online Resource]. Available at: http://www.msd.com.ua/principy-lazerov/kvantovo-kaskadnye-lazery (accessed 02 December 2015) (in Ukraine).

2. Kvantovo-kaskadnye lasery. Perevod Malakhova P. [Quantum-Cascade Lasers] *Scientific-educational project "Laser portal"* [Online Resource]. Available at: www.laserportal.ru/coherent_726 (accessed 02 December 2015) (in Russian).

3. Barash L. *Sozdan samyi moshchnyi teragerzovyi kvantovo-kaskadnyi lazer*. [Created a Powerful Terahertz Quantum-Cascade Laser] Available at:

http://ko.com.ua/sozdan_samyj_moshhnyj_teragercevyj_kvantovyj_kaskadnyj_lazer_104224 (accessed 02 December 2015) (in Ukraine).

4. Issledovateli iz Prinstona otkryli novyi tip lazernoi generatsii [Researchers at Princeton Discovered a New Type of Laser Generation]. *Nanotechnology News Network* [Online Resource]. Available at: www.nanonewsnet.ru/articles/2008/issledovateli-iz-prinstona-otkryli-novyi-tip-lazernoi-generatsii (accessed 02 December 2015) (in Russian).

5. Uchenye smogli sozdat' 1-Vt kvantovo-kaskadnyi lazer teragertsovogo diapazona [Scientists were able to Create a 1-watt Quantum Cascade Laser Terahertz Range]. *Overclockers* [Online Resource]. Available at: http://www.overclockers.ru/hardnews/58916/Uchenye_smogli_sozdat_1-Vt_kvantovo-kaskadnyj_lazer_teragercevogo_diapazona.html (Accessed 05 May 2015) (in Russian).

6. Sozdan kvantovyi kaskadnyi lazer s rekordnoi effektivnostju energopreobrazovanija. [Created Quantum Cascade Laser with Record Efficiency Servoproportional]. *Computerra* [Online Resource]. Available at: http://www.science.compulenta.ru/494202 (accessed 02 December 2015) (in Russian).

7. Zasavitskii I. I. Rekordnye kharakteristiki kvantovykh kaskadnykh lazerov [Record the Characteristics of Quantum Cascade Lasers]. *15-th all-Russian seminar on DLS*. October 31, 2012, Moscow. Available at: http://www.spsl.nsc.ru/FullText/konfe/ДЛС-18.pdf (accessed 07 July 2015) (in Russian).

8. Zasavitskii I. I. Dostizheniia v oblasti kvantovykh kaskadnykh lazerov (KKL) i ikh primenenii [Achievements in the Field of Quantum Cascade Lasers (CCL) and their Applications] *International conference "Radiation physics of solids" named after P. N. Lebedev RAS*. Available at: www.dis.dpi.ru/rus/sem/6/KKL_DIS2006RUS.pdf. (accessed 08 July 2015) (in Russian).

9. Demikhovskii V. Ya. Qantum Wells, Wires and Dots. *Soros educational journal*, 1997, no. 5, pp. 80-86. Available at: http://stat.phys.spbu.ru/Metod/Kvantovie_jami.pdf (accessed 02 December 2015) (in Russian).

10. Kvantovo-kaskadnyi lazer perevernul vse predstavlenija fizikov. [A Quantum-Cascade Laser has Changed the Impression of Physicists]. *Hi-Tech Mail.ru* [Online Resource]. Available at: www.http://hi-tech.mail.ru/review/kvantovo_kaskanye lazery. (accessed 02 December 2015) (in Russian).

11. Lastovkin A. A. Kvantovo-kaskadnye lazery [Quantum-cascade lasers]. IPM RAS. *MyShared* [Online Resource]. Available at: www.myshared.ru/slide/1755045/lastovkin.ppt (accessed 10 July 2015) (in Russian).

12. Andronov A. A., Zakharov N. G., Marugin D. V., Savikin A. P. *Novye istochniki i priemniki IK i teragertsovogo diapazona* [New Sources and Detectors of Infrared and Terahertz Range]. Nizhny Novgorod, Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod Publ., 2007, 95 p. Available at:

www.unn.ru/pages/issues/aids/2007/27.pdf. (accessed 02 December 2015) (in Russian).

13. Teragertsovyi perestraivaemyi lazer – novyi tip khimicheskogo analizatora [Terahertz Tunable Laser is a New Type of Chemical Analyzer]. *DailyTechInfo* [Online Resource]. Available at: www.dailytechinfo.org/news/829 (accessed at 02 December 2015) (in Russian).

14. Vaks V.L., Domracheva E.G., Pripolzin S.I., Sobakinskaja E.A., Chernjaeva M.B. Pretsizionnye spektrometry na osnove kvantovo-kaskadnykh lazerov. Problemy i vozmozhnye puti ikh resheniia. [Precise Spectrometers Based on Quantum Cascade Lasers. Problems and Possible Solutions]. *Vestnik of Lobachevsky University of Nizhni Novgorod*, 2011, vol. 1, no. 6, pp. 93–98. Available at: www.http://cyberlenica.ru/article/pretzisionye-spetrometry-na-osnove-kvantovo-kaskadnyh-lazerov-problemy-i-vozmozhnostye-puti-ih-reshenye. (accessed 02 December 2015) (in Russian).

15. Coef J., Fisher M., Legge M., Seifert J., Verner R. Lazery s raspredelennymi breggovskimi reshetkami na kvantovykh iamakh, tochkakh i s kvantovymi kaskadami [Lasers with Distributed Bragg Gratings in Quantum Wells, Dots and Quantum Cascades]. *Photonics*, 2008, no. 4, pp. 12–16 (in Russian).

16. Razlichnye tipy kvantovo-kaskadnykh lazerov [Different Types of Quantum-Cascade Lasers]. *Scientific-educational project "Laser portal"*. Available at: www.lazer.Portal.ru.content_731.htm. (accessed 15 August 2015) (in Russian).

17. Kvantovo-kaskadnye lazery pozvoliaiut detal'no rassmotret' nanoob"ekty [Quantum Lasers Allow Detailed Consideration of Nanoobjects]. *Computer system*. Available at: www.pcwork.ru/kvantovyie_lazeryi_pozvolayut_detalno_rassmotret_nanoobektyi.html. (accessed 02 December 2015) (in Russian).

18. Maulini R., Lyakh A., Tsekoun A., Kumar C., Patel N. λ~7.1 μm quantum cascade lasers with 19% wall-plug efficiency at room temperature. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 18, pp. 17203–17211.

19. Xue Huang, Charles W. O., Gmachi C. Temperature-intensitive long-wavelength (λ≈14 μm) Quantum Cascade Lasers with low threshold. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 9, pp. 8297–8302.

20. Xue Huang, Chiu Y, Charles W. O., Gmachi . Ridge-width depencende of the threshold of long wavelength (λ≈14 μm) quantum cascade lasers with sloped and vertical sidewalls. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 2539–2547.

21. Bewley W. W., Canedy C. I., Kim C. S. Continous-wave interband cascade lasers operating above room temperature at λ=4.7 – 5.6 μm. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 3, pp. 3235–3240.

22. Fuchs P., Friedl J., Höfling S. Single mode quantum cascade lasers with shallow-etched distributed Bragg reflector. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 3890–3897.

23. Lyakh A., Maulini R., Tsekovn A. Tapered 4.7 μm quantum cascade lasers with highly strained active region composition delivering over 4.5 watts of continuous wave optical power. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 4382–4388.

24. Menzel S., Diehl L., Pflűgel C. Quantum cascade laser master-oscillator power-amplifier with 1.5 W output power at 300 K. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 17, pp. 16229–16235.

25. Fathololoumi S., Dupurt E., Chan C.W.I. Terahertz quantum cascade lasers operating up to ~200 K with optimized oscillator strength and improved injectiontunneling. *Optics Express*, 2012, vol. 20, no. 4, pp. 3866–3876.

26. *Quantum Cascade Laser*. The catalog company Frankfurt Laser Co., Germany, 2015. Available at: www.frlaserco.com. (accessed 20 September 2015).

27. *Kvantovo-kaskadnye lazernye diody*. Katalog kompanii Azimut Fotoniks. Optoelektronnye komponenty [Quantum-Cascade Laser Diodes]. Directory of the company Azimut Photonic. Optoelectronic components. The Russian Federation, Moscow, 2015 (in Russian).

28. *Quantum-Cascade Laser*. Directory of Hamamatsu Photonics K. K. Japan, 2015.

29. *Quantum-cascade lasers*. The company catalogue with WLaser, of the Russian Federation, Moscow, 2015. Available at: www.wlaser.ru/diode. (accessed 09 October 2015) (in Russian).

30. Geikhman I. L., Volkov V. G. *Videnie i bezopasnost'* [Vision and Safety].Moscow, News Publ., 2009, 850 p. (in Russian).

31. Volkov V.G., Gindin P.D. *Tekhnicheskoe zrenie. Innovatsii* [Technical Vision. Innovations]. Moscow, Technosphera Publ., 2014, 850 p. (in Russian).

32. Aleev R.M., Ivanov V.P., Ovsjannikov V.A. *Neskanirujushie teplovisornye pribory. Osnovy teorii i rascheta* [Thermal Imaging Devices. Fundamentals of Theory and Calculation]. Kazan, Publishing house of Kazan University, 2004, 228 p. (in Russian).

33. *Thermal imaging cameras in security systems*. The Directory of the company FLIR Systems, USA, 2015.

34. *Avtomobil'naia sistema nochnogo videniia PathFundIR II* [Automotive Night Vision System PathFundIR II]. The brochure of the company Pergam, Moscow, 2015(in Russian).

35. *Kombinirovanyi osvetitel'-tseleukazatel' 2IKS-KLEShch + LTsU* [Combined Illuminator-Designator 2ICS-MITE + LCC]. The brochure of the company "Zenit", Moscow, 2015 (in Russian).

36. *Lasernyi dal'nomer LRM 2000* [Laser Rangefinder LRM 2000]. The brochure of JSC "Shvabe-Fotopribor", Moscow, 2014 (in Russian).

37. *Thermal imaging cameras for surveillance of the borders and the coastline at large distances.* The Directory of the company FLIR Systems, USA, 2015.

38. *Lasernyi izmeritel' skorosti «Luch-M»* [The Laser Speed Meter "Luch-M"]. The brochure of Ltd "NII "Polyus" n. a. M. F. Stelmakh JSC "Schwabe", Moscow, 2015 (in Russian).

39. *Atmosfernye opticheskie linii peredachi dannykh FSO* [Atmospheric Optical Data Link FSO (Free Space Optics)]. Prospect the Ryazan State instrument-making plant, Ryazan, 2014 (in Russian).

**Статья поступила 20 ноября 2015 г.**

## Сведения об авторе

*Волков Виктор Генрихович* – доктор технических наук, академик Российской академии естественных наук. Профессор кафедры РЛ-2 «Лазерные и оптико-электронные системы». Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: приборы визуализации изображения. E-mail: volkvik2009@yandex.ru.

Адрес: Россия, 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

---

# Quantum Cascade Lasers and their Application in Safety and Communication Systems

V. G. Volkov

***The purpose*** *of this paper is to describe current level of development of quantum-cascade lasers (CCL), their characteristics and capabilities, and assess the feasibility of using CCL in the security systems and communications. The used research method –* ***method*** *of calculating the range of the recognition and targeting in thermal imaging devices (TVP), is made on the basis of microbolometer matrices, when combined with CCL Teor.* ***Novelty****: this was the* first *time when Author considering the use of CCL in the security systems and communications. Similar to the known publications on these issues are absent.* ***Results****: created a VIP with infra-red (IR) illuminators or designators on the basis of the CCL in fixed, mobile, transportable and portable (head-mounted). The VIPs feature in that it ensures the preservation of the range of the recognition and targeting at the fall of the temperature contrast of the object with the background not less than 10 times compared with a normalized value. System clock and all-weather operation created with the application of CCL on the basis of specific examples, including a universal sighting complexes, combined infra-red illuminators-target designators, laser rangefinders and lidars.* ***Practical value:*** *the results can be used to create instruments for observation, aiming, driving patrol vehicles, aiming and targeting, accurate measurement of range and speed weatherproof and persistent action in the interest of the security services and police, as well as all weather systems atmospheric laser communication. The use of CCL in the inspection system based on the use of T-rays will work in the range of to 300 microns and to create a portable and mobile equipment. The use of CCL in atmospheric laser communication systems to ensure all-weather capability.* ***The prospects*** *for further development of the results – application in devices more powerful CCL with power exceeding 100 watts in CW and in pulsed mode at room temperature, do high efficiency. CCL when working in continuous mode above 30%, the creation of CCL for short-wave spectral region from 2 to 4 μm, a gap of 20 to 70 μm in the working range of wavelengths CCL, increase the power of terahertz radiation CCL and do their work in thermoelectric cooling.* ***Conclusions****: the new generation of devices for security systems and communications allows you to eliminate the known disadvantage of the NT – the sharp decline in their range at low temperature of the object contrasts with the background. For measurements of distance, speed and the atmospheric connection is to provide year-round and all-weather performance.*

***Keywords:*** *quantum cascade laser, the working region of the spectrum, output power, efficiency, terahertz wavelength range, security system, atmospheric communication, range, speed, measurement accuracy, field of view angle.*

## About the Author

*Viktor Genrichovich Volkov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Academician of Russian Academy of Natural Sciences. Professor at the Department RL-2 “Laser and Optic Electron Systems”. Bauman Moscow State Technical University. Field of research: devices of images visualization. E-mail: volkvik2009@yandex.ru

Address: Russia, 105005, Moscow, 2nd Baumanskaya str., 5-1.

УДК 623.624

# Показатели своевременности обслуживания трафика в системе массового обслуживания *Pa*/*M*/1 на основе аппроксимации результатов имитационного моделирования

Ушанев К. В., Макаренко С. И.

***Постановка задачи:*** *Развитие телекоммуникационных систем и рост объема мультимедийного трафика, передаваемого через них, актуализируют вопросы обеспечения своевременности и качества его обслуживания. Анализ реальных трасс передачи мультимедийного трафика показывают, что такой трафик обладает свойством структурной сложности. При этом наличие этого свойства ведет к существенному снижению своевременности обслуживания трафика в узлах сети.* ***Целью работы*** *является проведение анализа своевременности обслуживания сложного трафика в узлах сети на основе имитационного моделирования и аппроксимации полученных результатов.* ***Используемые методы.*** *Для моделирования обслуживания трафика в узле использовались модели систем массового обслуживания M/M/1 (для простого трафика) и Pa/M/1 (для трафика со сложной структурой). Оценка своевременности обслуживания трафика проводилась по показателю – время задержки пакета в модели узла. В качестве метода исследования было выбрано имитационное моделирование, а в качестве инструментария – среда имитационного моделировании GPSS World. При выводе аналитических выражений для зависимости своевременности обслуживания трафика от уровня загрузки узла и уровня сложности трафика использовалось двухуровневая аппроксимация результатов имитационного моделирования.* ***Новизна.*** *Элементом новизны работы является аналитическое выражение для показателя своевременности обслуживания сложного трафика, одновременно учитывающее как уровень загрузки узла, так и уровень сложности трафика.* ***Результаты и их значимость.*** *Полученное аналитическое выражение для оценки своевременности обслуживания сложного трафика может быть использовано при решении прикладных задач проектирования и анализа сетей связи при передаче мультимедийного трафика в условиях высокой загрузки сети. Кроме того, данное выражение может быть использовано для проверки достоверности результатов ранее проведенных исследований, основанных на аналитических методах оценки качества обработки заявок в системах массового обслуживания.*

***Ключевые слова:*** *трафик, распределение Парето, обработка трафика, пакетная коммутация.*

## Актуальность

Развитие телекоммуникационных систем и рост объема мультимедийного трафика (речь, видеоданные, потоки реального времени M2M), передаваемого через них, актуализируют вопросы обеспечения своевременности и качества обслуживания QoS (Quality of service) мультимедийного трафика. Анализ реальных трасс передачи мультимедийного трафика, проведенный в работах [1-3] показывает, что мультимедийный трафик обладает свойством структурной сложности. Наличие этого свойства ведет к снижению своевременности обслуживания трафика в узлах сети.

Под трафиком со сложной структурой будем понимать трафик, у которого коэффициент вариации $c_\tau$ интервала времени между очередными пакетами имеет значения $c_\tau>1$. Коэффициент вариации $c_\tau$ – дисперсионная характеристика трафика, определяющая его структурную сложность, и вычисляемая в соответствии с выражением [4]:

$$c_\tau=\sigma_\tau/m_\tau,$$

где $\tau$ – интервал времени между очередными пакетами трафика; $m_\tau$ – математическое ожидание значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика; $\sigma_\tau$ – среднее квадратическое отклонение значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика.

Под своевременностью обслуживания трафика в узле сети будем понимать время от момента прихода начала пакета в узел, до момента покидания пакетом узла. Это время определяется задержкой при ожидании пакета в буфере узла и временем его обработки в коммутационном устройстве. При этом время обработки в коммутационном устройстве определяется объемом пакета и, как правило, для этого времени принимается допущение об экспоненциальном законе его распределения.

В работах [3, 5-7] показано, что эффективное решение задач маршрутизации, своевременной передачи информации, критичной к задержкам, а также мультимедийной информации невозможно решать без учета свойств структурной сложности трафика. Таким образом, необходимо учитывать влияние структуры трафика на его передачу по каналам и обработку в узлах сети.

В работах [8-23, 31, 34-39] на основе моделей теории систем массового обслуживания (СМО) были исследованы процессы обработки сложного трафика в узлах сети. В результате проведенных исследований был выявлен эффект существенного (в десятки раз) снижения своевременности обслуживания сложного трафика ($c_\tau$>1) относительно обслуживания простого трафика, моделируемого простейшим пуассоновским потоком ($c_\tau$=1). Виду того, что вышеуказанными авторами для оценки своевременности обслуживания трафика в узлах использовались различные методические подходы и допущения, то зачастую полученные результаты значительно расходятся. Кроме того, в большинстве исследований не учитываются уровень структурной сложности трафика, а также влияние загрузки коммутатора узла на получаемые результаты.

## Постановка задачи

Указанные выводы актуализируют проведение исследований своевременности обслуживания сложного трафика без введения дополнительных ограничений, связанных с поиском аналитических решений, которые могли бы служить своеобразным эталоном. В связи с этим в качестве исследовательского методического аппарата было выбрано имитационное моделирование, а в качестве инструментария исследования – среда имитационного моделировании GPSS World. При этом результаты исследования на основе имитационного моделирования позволят проверить достоверность результатов ранее проведенных исследований, основанных на аналитических методах оценки QoS в СМО [1, 3-7, 13-17, 22-31, 34-39], а также установить границы применимости этих методов для расчета показателей обслуживания сложного трафика.

Цель работы – построение и исследование аналитических зависимостей уровня своевременности обслуживания сложного трафика от значения показателей сложности и загрузки узла сети за счет аппроксимации результатов имитационного моделирования.

Достижение цели исследования обеспечивается последовательным решением частных задач:

1) проведением имитационного моделирования обслуживания сложного трафика в узле сети при различных показателях сложности и загрузки узла;
2) аппроксимацией результатов имитационного моделирования для каждого конкретного значения показателя сложности структуры в зависимости от уровня загрузки узла;
3) поиском общих закономерностей и двухуровневой аппроксимацией показателей своевременности в зависимости, как от показателя сложности, так и от показателя загрузки узла.

В качестве модели сложного трафика использовался поток, в котором время между приходом заявок имеет Парето-распределение. Выбор Парето-распределения в качестве модели сложного трафика обусловлено следующими соображениями.

Во-первых, как показано в работе [21], сложный трафик с коэффициентом вариации $c_\tau>1$ может быть представлен моделью потока с Парето-распределением

$$F(\tau)=1-\left(\frac{k}{\tau}\right)^{\alpha}, k>0, \alpha>0, \tau>k, \qquad (1)$$

где $\tau$ – интервал времени между поступлением очередных заявок в потоке с распределением Парето; $k$ – коэффициент масштаба; $\alpha$ – параметр формы распределения Парето.

Зависимость между коэффициентом вариации $c_\tau$ и параметром $\alpha$ распределения Парето в диапазоне $\alpha\epsilon[1,2; 2]$ с погрешностью до 3,27% может быть аппроксимирована выражением [21]

$$c_\tau(\alpha)=1,41\cdot 10^4\cdot e^{-5,384\cdot\alpha}+1,52,$$

откуда

$$\alpha=\frac{1}{5,384}\ln\left(\frac{c_\tau+1,52}{1,41\cdot 10^4}\right). \qquad (2)$$

Во-вторых, как показано в работах [1, 6, 9, 12, 15, 18, 23-25, 29, 32, 33] самоподобный трафик с коэффициентом Херста $H$ также может быть представлен моделью потока с Парето распределением (1). При этом зависимость между коэффициентом Херста в диапазоне $H\epsilon(0,5; 1]$ и параметром $\alpha$ имеет вид [6, 15, 23, 32, 33]

$$\alpha=3-2H. \qquad (3)$$

В-третьих, корректность и адекватность моделирования сложного трафика потоком с Парето распределением моментов поступления заявок

подтверждается аналогичным подходом, используемым различными исследователями в работах [17, 22, 23, 29, 31].

Для формализации задачи в работе введены следующие обозначения:

$\tau$ – интервал времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$\alpha$ – параметр формы распределения Парето;

$k$ – коэффициент масштаба распределения Парето;

$H$ – коэффициент Херста, определяющий уровень самоподобия трафика;

$m_\tau$ – математическое ожидание значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$\sigma_\tau$ – среднее квадратическое отклонение значений интервала времени между поступлением очередных пакетов трафика;

$c_\tau$ – дисперсионная характеристика трафика, определяющая его структурную сложность;

$\lambda$ – интенсивность поступления заявок в потоке с экспоненциальным распределением интервалов времени между ними (имитационная модель $M/M/1$);

$\mu=1/T_{обсл}=1$ – интенсивность обслуживания потока заявок в имитационных моделях $Pa/M/1$ и $M/M/1$;

$Q=\infty$ – объем буфера в имитационных моделях $Pa/M/1$ и $M/M/1$;

$\rho$ – загрузка СМО;

$T_{обсл}=1$ – время обработки заявки в устройстве обслуживания;

$T_{зад}$ – время задержки заявки в узле;

$T_{зад\ exp}$ – время задержки заявки в узле для потока с экспоненциальным распределением моментов поступления заявок;

$T_{зад\ par}$ – время задержки заявки в узле для потока с Парето-распределением моментов поступления заявок;

$T_{зад\ par}(\rho)$ – функция, аппроксимирующая результаты имитационного моделирования времени задержки заявок потока с Парето-распределением $T_{зад\ par}$ в узле в зависимости от уровня загрузки узла $\rho$ при определенном уровне сложности трафика $\alpha$;

$T_{зад\ exp}(\rho)$ – функция, аппроксимирующая результаты имитационного моделирования времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением $T_{зад\ exp}$ в узле в зависимости от уровня загрузки узла $\rho$;

$T_{зад\ par}(\alpha, \rho)$ – функция, аппроксимирующая результаты имитационного моделирования времени задержки заявок потока с Парето-распределением $T_{зад\ par}$ в узле в зависимости от уровня загрузки узла $\rho$ при различных значениях уровня сложности трафика $\alpha$;

$T_{зад\ par}^*(\alpha, \rho)$ – значение времени задержки заявок потока с Парето-распределением в узле, полученное при проведении имитационного моделирования в зависимости от уровня загрузки $\rho$ узла и уровне сложности трафика $\alpha$;

$A_\rho$, $B_\rho$, $C_\rho$ – параметры функции аппроксимации для $T_{зад\ par}(\rho)$ и $T_{зад\ exp}(\rho)$;

$A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$ – функции, аппроксимирующие значения параметров $A_\rho$, $B_\rho$ и $C_\rho$ при различных значениях $\alpha$;

$D_\alpha$, $E_\alpha$, $F_\alpha$ – параметры аппроксимации для функций $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$ и $C_\rho(\alpha)$;
$\delta$ – относительная погрешность аппроксимации.

## Имитационное моделирование обслуживания сложного трафика с Парето-распределением

Для исследования своевременности обработки сложного трафика – времени задержки $T_{зад}$ пакетов в узле связи была использована имитационная модель с Парето-распределением моментов поступления потока заявок и экспоненциальным временем обслуживания *Pa*/*M*/1 (рис. 1), разработанная одним из авторов в среде GPSS World. Текст данной модели представлен в приложении 1, и она была подробно исследована в работе [21].

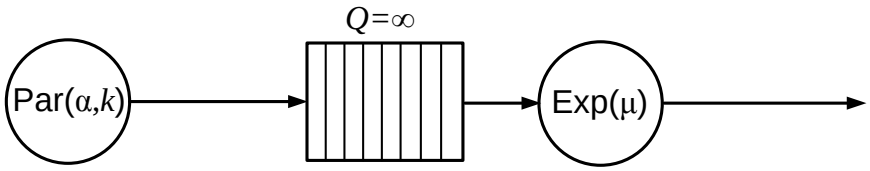



Рис. 1. Имитационная модель *Pa*/*M*/1 обслуживания трафика с распределением Парето

Для проведения сравнительного анализа результатов обслуживания сложного и простого трафиков была использована имитационная модель с экспоненциальным распределением моментов поступления и обслуживания потока заявок *M*/*M*/1 (рис. 2). Текст данной модели в среде имитационного моделирования GPSS World представлен в приложении 2.

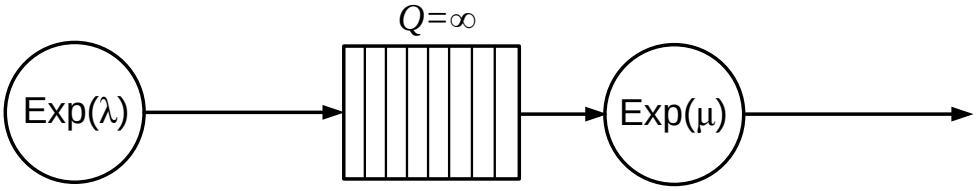



Рис. 2. Имитационная модель *M* /*M*/1 обслуживания трафика с экспоненциальным распределением

При проведении моделирования для имитационных моделей были введены следующие ограничения [21].

1. Объем буфера $Q=\infty$.
2. Время обработки заявки в устройстве обслуживания принято за единицу $T_{обсл}=1/\mu=1$. К данному времени нормированы все результаты моделирования.
3. Значение параметра $\alpha$ распределения Парето в имитационной модели *Pa*/*M*/1 выбиралось из диапазона $\alpha\epsilon[1{,}2;\ 2]$ с шагом 0,1.
4. Значение коэффициента масштаба $k$ распределения Парето в имитационной модели *Pa*/*M*/1 выбиралось таким, чтобы обеспечить исследование модели со значением загрузки СМО $\rho$ в диапазоне $\rho\epsilon[0{,}1;\ 1)$ с шагом 0,1. Выбор конкретного значения $k$,

соответствующего необходимому уровню загрузки ρ, определялся по выражению [21]:

$$\rho = \frac{T_{\text{обсл}}}{m_{\text{par}}\left(\tau_{\text{par}}\right)} = \frac{T_{\text{обсл}}\left(\alpha - 1\right)}{\alpha \cdot k}, \Rightarrow k = \frac{T_{\text{обсл}}\left(\alpha - 1\right)}{\alpha \cdot \rho}. \quad (4)$$

5. Значение интенсивности входного потока λ в имитационной модели *M*/*M*/1 выбиралось таким, чтобы обеспечить равенство математического ожидания потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями [21]:

$$m_{\text{par}}\left(\tau_{\text{par}}\right) = m_{\text{exp}}\left(\tau_{\text{exp}}\right), \Rightarrow \frac{\alpha \cdot k}{\alpha - 1} = \frac{1}{\lambda}, \Rightarrow \lambda = \frac{\alpha - 1}{\alpha \cdot k} = \frac{\rho}{T_{\text{обсл}}}. \quad (5)$$

6. В каждом эксперименте с имитационными моделями *M*/*M*/1 и *Pa*/*M*/1 с определенной комбинацией параметров λ, α, *k*, ρ проводилась генерация серии из $10^7$ заявок. Для каждой такой комбинации параметров проводилось 20 экспериментов с различными номерами генераторов экспоненциального распределения в устройстве обслуживания (см. листинги программ в приложениях 1 и 2). Это позволило обеспечить доверительную вероятность 0,99 при 1% доверительном интервале: $T_{\text{зад}} \pm 0{,}01 T_{\text{зад}}$.

Вышеуказанные ограничения позволили провести сравнительный анализ своевременности обслуживания потоков с Парето- и экспоненциальным распределениями в широком диапазоне загрузки СМО ρ при равенстве математических ожиданий исследуемых потоков. Частные результаты проведенного исследования представлены в таблице 1 по материалам работы [21].

Результаты проведенного моделирования позволили сформировать первоначальный базис статистических данных для проведения аппроксимации и получения аналитических выражений для оценки зависимости $T_{\text{зад}}(\rho)$ при различных значениях α.

Таблица 1 – Результаты оценки уровня своевременности обслуживания сложного и простого трафика в зависимости от уровня загрузки устройства обслуживания [21]

| $T_{обсл}$ | | | 1 | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Загрузка ρ** | | | **0,1** | **0,2** | **0,3** | **0,4** | **0,5** | **0,6** | **0,7** | **0,8** | **0,9** |
| МОЖ $m_\tau$, соответствующая значению загрузки ρ при $T_{обсл}$=1 | | | 10 | 5 | 3,333 | 2,5 | 2 | 1,667 | 1,427 | 1,25 | 1,111 |
| Экспон. | | $T_{зад\ exp}(\rho)$ | 1,11 | 1,25 | 1,43 | 1,67 | 2,0 | 2,5 | 3,33 | 4,87 | 9,95 |
| Параметры распределения Парето | **α=2** | $k^*$ | 5,0 | 2,5 | 1,667 | 1,25 | 1,0 | 0,834 | 0,714 | 0,625 | 0,556 |
| | $c_\tau$=1,62 $H$=0,5 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,0 | 1,04 | 1,13 | 1,3 | 1,57 | 2,01 | 2,81 | 4,56 | 10,5 |
| | **α=1,9** | $k^*$ | 4,737 | 2,368 | 1,579 | 1,184 | 0,947 | 0,79 | 0,677 | 0,592 | 0,526 |
| | $c_\tau$=1,95 $H$=0,55 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,001 | 1,042 | 1,148 | 1,33 | 1,624 | 2,109 | 3,0 | 5,015 | 12,03 |
| | **α=1,8** | $k^*$ | 4,444 | 2,222 | 1,48 | 1,11 | 0,889 | 0,741 | 0,635 | 0,556 | 0,494 |
| | $c_\tau$=2,44 $H$=0,6 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,002 | 1,05 | 1,169 | 1,372 | 1,7 | 2,25 | 3,286 | 5,646 | 14,36 |
| | **α=1,7** | $k^*$ | 4,117 | 2,059 | 1,372 | 1,029 | 0,823 | 0,686 | 0,588 | 0,515 | 0,457 |
| | $c_\tau$=3,15 $H$=0,65 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,003 | 1,061 | 1,2 | 1,43 | 1,81 | 2,46 | 3,71 | 6,67 | 19,68 |
| | **α=1,6** | $k^*$ | 3,75 | 1,875 | 1,25 | 0,938 | 0,75 | 0,625 | 0,536 | 0,468 | 0,417 |
| | $c_\tau$=4,2 $H$=0,7 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,005 | 1,077 | 1,24 | 1,513 | 1,968 | 2,771 | 4,367 | 8,54 | 27,51 |
| | **α=1,5** | $k^*$ | 3,333 | 1,667 | 1,111 | 4 | 0,667 | 0,556 | 0,476 | 0,417 | 0,37 |
| | $c_\tau$=6 $H$=0,75 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,01 | 1,1 | 1,31 | 1,65 | 2,23 | 3,3 | 5,61 | 11,9 | 48,61 |
| | **α=1,4** | $k^*$ | 2,857 | 1,429 | 0,952 | 0,714 | 0,571 | 0,476 | 0,408 | 0,357 | 0,317 |
| | $c_\tau$=8,97 $H$=0,8 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,016 | 1,15 | 1,42 | 1,88 | 2,73 | 4,38 | 8,29 | 21,09 | 120,8 |
| | **α=1,3** | $k^*$ | 2,308 | 1,154 | 0,769 | 0,577 | 0,462 | 0,385 | 0,33 | 0,288 | 0,256 |
| | $c_{\tau\ par}$=14,2 $H$=0,85 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,033 | 1,24 | 1,65 | 2,4 | 3,88 | 7,22 | 16,74 | 61,98 | 575,4 |
| | **α=1,2** | $k^*$ | 1,667 | 0,834 | 0,556 | 0,417 | 0,333 | 0,278 | 0,238 | 0,208 | 0,185 |
| | $c_\tau$=23,6 $H$=0,9 | $T_{зад\ par}(\rho)$ | 1,08 | 1,48 | 2,31 | 4,1 | 8,6 | 22,2 | 78,5 | 463,6 | 16542 |

Примечания.

- В таблице значения, выделенные серым цветом, соответствуют параметрам загрузки СМО ρ, желтым – значениям своевременности обслуживания в модели $M/M/1$ потока с экспоненциальным распределением, интенсивность которого определяется в соответствии с выражением (5), зеленым – значениям своевременности обслуживания в модели $Pa/M/1$ потока с Парето-распределением, параметры которого заданы в ячейках розового цвета.
- Значение $k^*$ приведено справочно и соответствует указанному в таблице уровню загрузки ρ устройства обслуживания в соответствии с выражением (4).
- В ячейках со значением параметра α дополнительно приведены значения коэффициента вариации $c_\tau$ и коэффициента Херста $H$, которые соответствуют указанному значению α.

## Аппроксимация результатов имитационного моделирования $T_{зад}(\rho)$ в зависимости от уровня загрузки узла для различного уровня сложности трафика

Проведенный анализ результатов имитационного моделирования, представленный в таблице 1, позволил сделать следующие предварительные выводы.

1. В обеих моделях СМО *M*/*M*/1 и *Pa*/*M*/1 при росте загрузки $0{,}6 \le \rho < 1$ своевременность обработки заявок снижается, а ее показатель – время задержки заявки в устройстве обслуживания $T_{зад}$ существенно возрастает, причем данный рост носит нелинейный характер.
2. В модели СМО *Pa*/*M*/1 характер снижения своевременности обработки (рост времени задержки $T_{зад\ par}$) определяется показателем сложности трафика, а именно параметром α распределения Парето. При этом, для большинства значений уровня сложности трафика, определяемого параметром α, при условии роста загрузки $0{,}6 \le \rho < 1$ значение времени задержки $T_{зад\ par}$ в СМО *Pa*/*M*/1 выше, чем $T_{зад\ exp}$ в модели СМО *M*/*M*/1 с экспоненциальным потоком заявок.
3. Нелинейный рост времени задержки $T_{зад\ par}$ в СМО *Pa*/*M*/1 при значениях загрузки $0{,}6 \le \rho < 1$ может быть аппроксимирован экспоненциальной функцией.

Для проведения аппроксимации был выбран диапазон значений загрузки СМО $0{,}6 \le \rho < 1$. Это было сделано по двум причинам. Во-первых, этот диапазон загрузок наиболее интересен для исследования с точки зрения практики, так как именно при высокой загрузке сети начинают проявляться негативные эффекты обработки сложного реального трафика. Во-вторых, именно этому диапазону загрузки соответствует экспоненциальный тип аппроксимирующей функции $T_{зад\ par}(\rho)$, что позволяет использовать этот тип для всех значений α, впоследствии перейдя к аппроксимации более высокого уровня.

При аппроксимации времени задержки $T_{зад\ par}(\rho)$ при конкретном значении параметра α и различных уровнях загрузки была использована экспоненциальная функция, имеющая вид:

$$T_{зад\ par}(\rho) = A_\rho e^{B_\rho \cdot \rho} + C_\rho, \qquad (6)$$

где $A_\rho$, $B_\rho$, $C_\rho$ – параметры аппроксимирующей функции.

Вычисление параметров аппроксимации $A_\rho$, $B_\rho$, $C_\rho$ производилось в программной среде MathCAD с использованием функции `expfit`.

В результате проведенной аппроксимации были получены значения параметров аппроксимирующих функций для различных значений α. Значения этих параметров, а также дополнительные параметры аппроксимации для различных значений α сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Параметры аппроксимирующих функций вида $T_{зад\ par}(\rho) = A_\rho e^{B_\rho \cdot \rho} + C_\rho$ для различных значений α

| Показатель сложности трафика в модели потока с Парето-распределением | | Значения параметров в функции $T_{зад\ par}(\rho)$ | | | Средняя относительная погрешность аппроксимации | Аппроксимируемый диапазон загрузки ρ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $A_\rho$ | $B_\rho$ | $C_\rho$ | | |
| Повышение сложности трафика | α=2 | $3{,}532 \cdot 10^{-4}$ | 11,237 | 1,778 | 2,1% | 0,6≤ρ≤0,9 |
| | α=1,9 | $3{,}147 \cdot 10^{-4}$ | 11,535 | 1,866 | 2,2% | |
| | α=1,8 | $2{,}411 \cdot 10^{-4}$ | 12,047 | 2,018 | 2,6% | |
| | α=1,7 | $1{,}239 \cdot 10^{-4}$ | 13,119 | 2,28 | 3,3% | |
| | α=1,6 | $1{,}187 \cdot 10^{-4}$ | 13,56 | 2,536 | 3,3% | |
| | α=1,5 | $3{,}583 \cdot 10^{-5}$ | 15,516 | 3,25 | 5,2% | |
| | α=1,4 | $2{,}727 \cdot 10^{-6}$ | 19,517 | 4,881 | 8,3% | |
| | α=1,3 | $3{,}344 \cdot 10^{-7}$ | 23,611 | 9,01 | 12% | |
| | α=1,2 | $7{,}485 \cdot 10^{-11}$ | 36,696 | 44,285 | 32,7% | |

Отдельные данные моделирования и аппроксимирующие их функции, а также абсолютные оценки погрешности аппроксимации в графическом виде представлены на рис. 3.

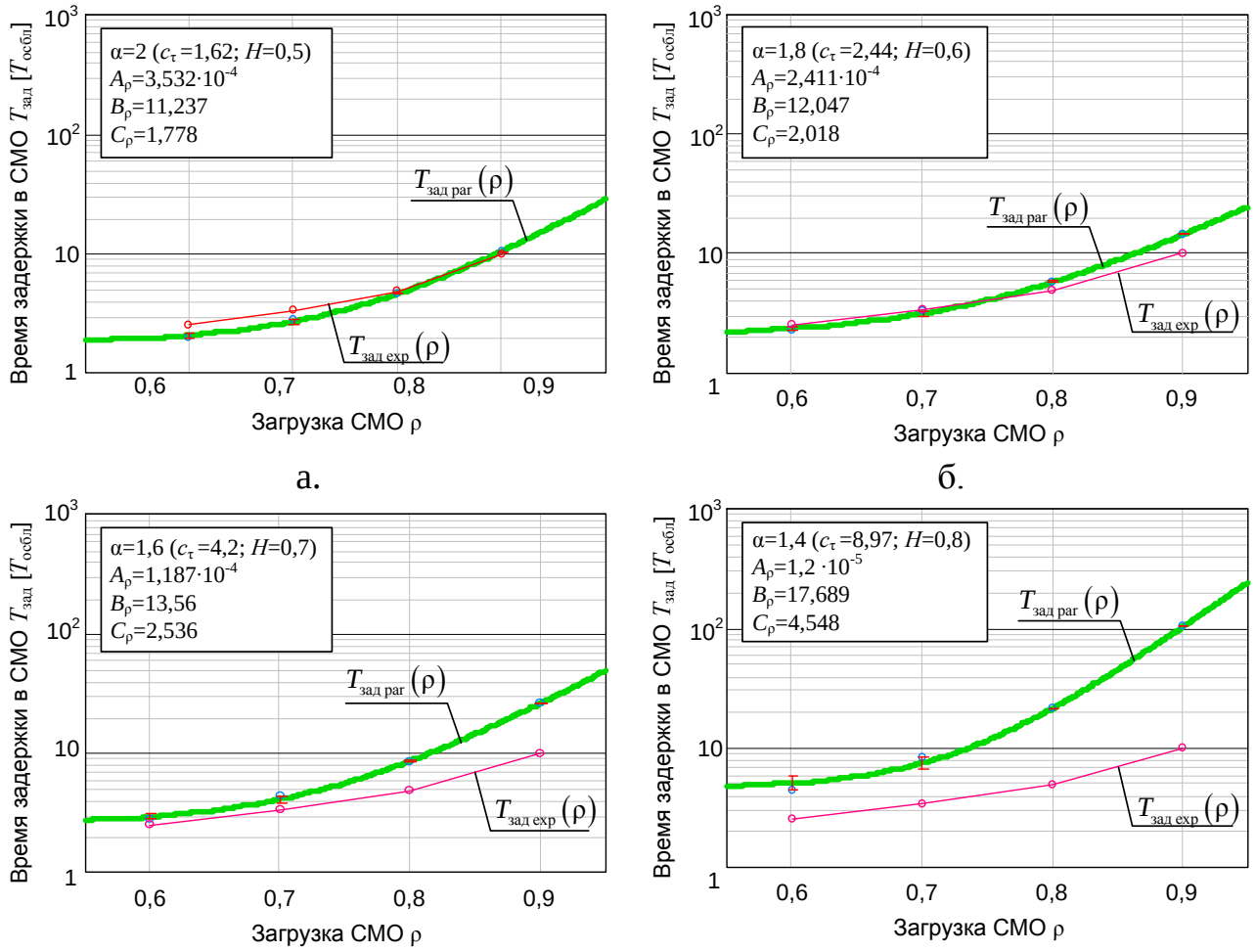



Рис. 3. Значения $T_{зад\ par}$, $T_{зад\ exp}$ полученные на основе имитационного моделирования в моделях СМО *Pa*/*M*/1, *M* /*M*/1 и аппроксимирующие их функции $T_{зад\ par}(\rho)$, $T_{зад\ exp}(\rho)$

Проведенный анализ погрешности аппроксимации (рис. 4) для функций $T_{зад\ par}(\rho)$ при различных значениях α, показал, что ошибки аппроксимации быстро убывают с увеличением загрузки СМО. Таким образом, аналитические функции $T_{зад\ par}(\rho)$ могут быть использованы для прикладных нужд, так как погрешность аппроксимации для большинства функций (при $1{,}3 \le \alpha \le 2$) не превышает 20% при значении загрузки ρ=0,67 и 10% – при ρ=0,75.

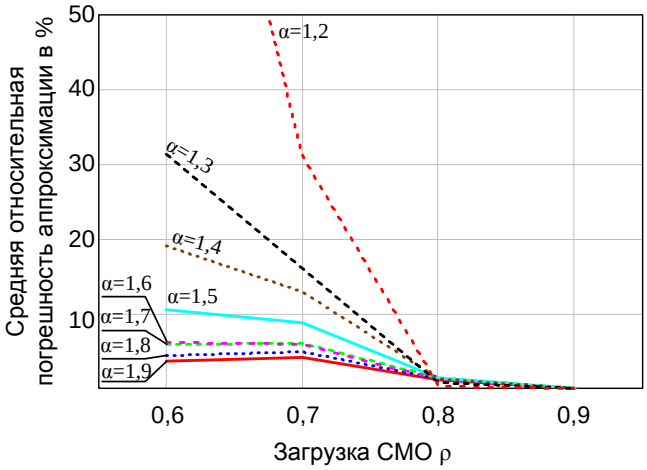



Рис. 4. Погрешности аппроксимации для функций $T_{зад\ par}(\rho)$ при различных значениях α

При аппроксимации значений времени задержки заявок потока с экспоненциальным распределением $T_{зад\ exp}$, полученного в результате имитационного моделирования СМО *M*/*M*/1, также была использована экспоненциальная функция вида:

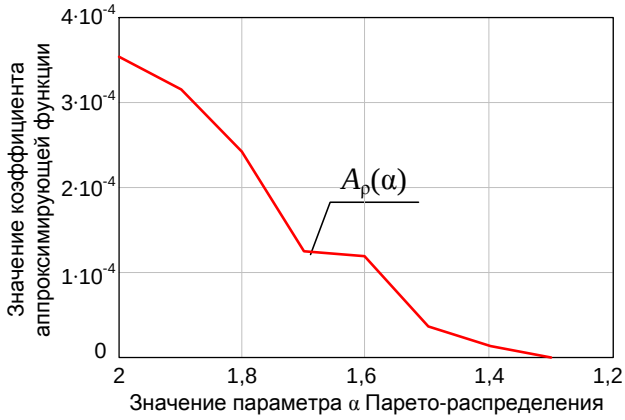
$$T_{зад\ exp}(\rho) = A_\rho e^{B_\rho \cdot \rho} + C_\rho . \qquad (7)$$

Параметры аппроксимации $A_\rho$, $B_\rho$, $C_\rho$, вычисленные в программной среде MathCAD с использованием функции `expfit` для обслуживания экспоненциального потока в СМО M/M/1 при $0{,}6 \le \rho \le 0{,}9$, равны $A_\rho = 5{,}9 \cdot 10^{-4}$, $B_\rho = 10{,}527$, $C_\rho = 2{,}255$. При этом средняя относительная погрешность аппроксимации составляет 2,2%.

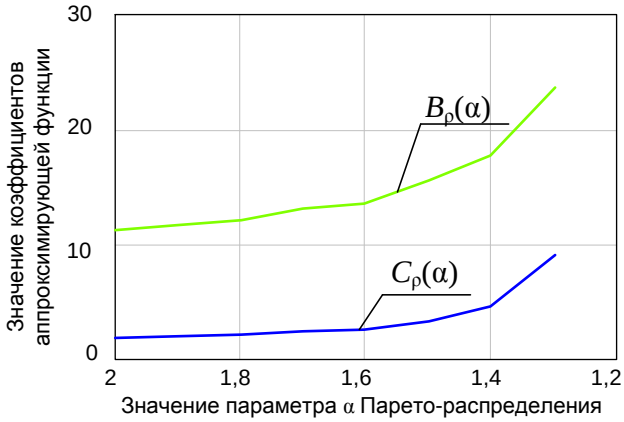
## Аппроксимация результатов имитационного моделирования $T_{зад}(\alpha, \rho)$ в зависимости от уровня загрузки узла и уровня сложности трафика

Изменение значений параметров $A_\rho$, $B_\rho$, $C_\rho$ в аппроксимирующей функцией $T_{зад\ par}(\rho) = A_\rho e^{B_\rho \cdot \rho} + C_\rho$ (таблица 2) в зависимости от показателя сложности трафика α в Парето-распределении представлено на рис. 5. Анализ этих графических зависимостей позволил прийти к выводу о возможности их дальнейшей аппроксимации (аппроксимации второго уровня) в виде функций $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$. Такая аппроксимация позволит аналитически обобщить результаты имитационного моделирования и сформировать аналитическое выражение для оценки времени задержки $T_{зад\ par}(\alpha, \rho)$ в зависимости, как от уровня загрузки узла, так и уровня сложности трафика.

Из результатов моделирования, которые были использованы для аппроксимации, были исключены данные для $T_{зад\ par}(\alpha=1{,}2)$. Это было сделано для повышения общей точности аппроксимации, так как данные для $T_{зад\ par}(\alpha=1{,}2)$ имеют высокую погрешность результатов, как имитационного моделирования, так и проведенной аппроксимации (34,5%).




а.




б.

Рис. 5. Изменение значений параметров $A_\rho$, $B_\rho$, $C_\rho$ в функции $T_{зад\ par}(\rho)=A_\rho e^{B_\rho\cdot\rho}+C_\rho$ в зависимости от показателя α Парето-распределения

При аппроксимации времени задержки $T_{зад\ par}(\alpha, \rho)$ была использована сложная экспоненциальная функция, имеющая вид:

$$T_{зад\ par}(\alpha, \rho)=A_\rho(\alpha)e^{B_\rho(\alpha)\cdot\rho}+C_\rho(\alpha), \tag{8}$$

где $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$ – функции, аппроксимирующие значения параметров $A_\rho$, $B_\rho$, $C_\rho$ при различных значениях α.

Ввиду сложности подбора аппроксимации для функции $A_\rho(\alpha)$ было принято решение об ее аппроксимации кусочно-непрерывной логистической функцией вида:

$$\begin{cases} A_{\rho,1}(\alpha)=\dfrac{D_{\alpha,1}}{1+E_{\alpha,1}e^{-\alpha(F_{\alpha,1})}}, \text{ при } 1{,}668<\alpha\le 2. \\ A_{\rho,2}(\alpha)=\dfrac{D_{\alpha,2}}{1+E_{\alpha,2}e^{-\alpha(F_{\alpha,2})}}, \text{ при } 1{,}3\le\alpha\le 1{,}668. \end{cases} \tag{9}$$

Выбор значения α=1,668 в качестве точки смены функциональной зависимости функции в выражении (9) обусловлен тем, что именно при этом значении параметра α значения функций $A_{\rho,1}(\alpha)$ и $A_{\rho,2}(\alpha)$ равны и их графики пересекаются (см. рис. 6).

Вычисление параметров аппроксимации $D_{\alpha,1}$, $E_{\alpha,1}$, $F_{\alpha,1}$, $D_{\alpha,2}$, $E_{\alpha,2}$, $F_{\alpha,2}$ для функций $A_{\rho,1}(\alpha)$ и $A_{\rho,2}(\alpha)$ производилось в программной среде MathCAD с использованием функции `lgsfit` при начальных параметрах: $D_{\alpha,1}=D_{\alpha,2}=1$, $E_{\alpha,1}=E_{\alpha,2}=1$, $F_{\alpha,1}=F_{\alpha,2}=1$.

Для аппроксимации функций $B_\rho(\alpha)$ и $C_\rho(\alpha)$, была использована экспоненциальная функция:

$$B_\rho(\alpha) = D_\alpha e^{E_\alpha \cdot \alpha} + F_\alpha,$$

$$C_\rho(\alpha) = D_\alpha e^{E_\alpha \cdot \alpha} + F_\alpha.$$

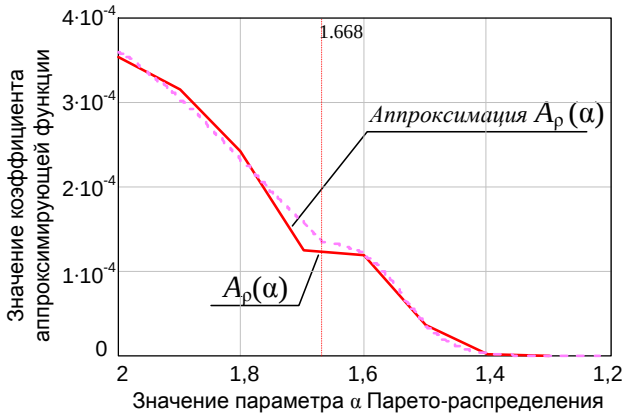
Вычисление параметров аппроксимации $D_\alpha$, $E_\alpha$, $F_\alpha$ для функций $B_\rho(\alpha)$ и $C_\rho(\alpha)$ производилось в программной среде MathCAD с использованием функции `expfit`.

В результате проведенной аппроксимации были получены значения параметров $D_\alpha$, $E_\alpha$, $F_\alpha$ аппроксимирующих функций для функций $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$. Эти значения, а также дополнительные параметры аппроксимации, сведены в таблицу 3.

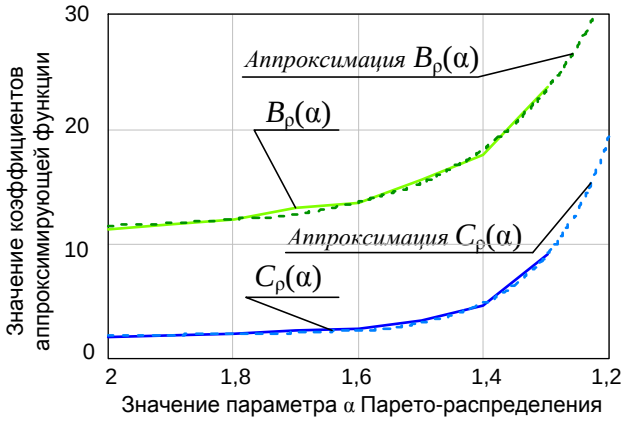
Таблица 3 – Параметры $D_\alpha$, $E_\alpha$, $F_\alpha$ аппроксимирующих функций для функций $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$

| Функция параметра в функции $T_{зад\ par}(\alpha, \rho)$ | Значения параметров $D_\alpha$, $E_\alpha$, $F_\alpha$ для функций $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$ | | |
|---|---|---|---|
| | $D_\alpha$ | $E_\alpha$ | $F_\alpha$ |
| $A_{\rho,1}(\alpha)$ | $4{,}435 \cdot 10^{-4}$ | $2{,}225 \cdot 10^{6}$ | 6,889 |
| $A_{\rho,2}(\alpha)$ | $1{,}384 \cdot 10^{-4}$ | $1{,}01 \cdot 10^{19}$ | 28,471 |
| $B_\rho(\alpha)$ | $5{,}52 \cdot 10^{3}$ | -4,652 | 10,74 |
| $C_\rho(\alpha)$ | $3{,}451 \cdot 10^{5}$ | -8,301 | 1,88 |

Значения функций $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$, а также абсолютные оценки погрешности аппроксимации представлены в графическом виде на рис. 6.




а.




б.

Рис. 6. Значения функций $A_\rho(\alpha)$, $B_\rho(\alpha)$, $C_\rho(\alpha)$, полученные на основе имитационного моделирования в модели СМО *Pa*/*M*/1

Обобщая полученные результаты, можно сделать вывод, что проведенные в работе [21] исследования своевременности обслуживания сложного трафика, представленного потоком с Парето-распределением моментов поступления заявок, со значениями параметра $1{,}3 \le \alpha \le 2$, основанные на имитационной модели

*Pa*/*M*/1 в диапазоне загрузки СМО 0,6≤ρ≤0,9, могут быть аппроксимированы следующей сложной функцией:

$$T_{\text{зад par}}(\alpha,\rho)=A_{\rho}(\alpha)\cdot\exp\left[\left(5{,}52\cdot10^{3}\exp(-4{,}652\alpha)+10{,}74\right)\rho\right]+$$
$$+\left(3{,}451\cdot10^{5}\exp(-8{,}301\alpha)+1{,}88\right), \qquad (10)$$

где

$$A_{\rho}(\alpha)=\begin{cases}\dfrac{4{,}435\cdot10^{-4}}{1+2{,}225\cdot10^{6}e^{-6{,}889\alpha}}, \text{ при } 1{,}668<\alpha\le2;\\[2ex] \dfrac{1{,}384\cdot10^{-4}}{1+1{,}01\cdot10^{19}e^{-28{,}471\alpha}}, \text{ при } 1{,}3\le\alpha\le1{,}668.\end{cases}$$

Графики, соответствующие исходным результатам имитационного моделирования (из таблицы 1) и аппроксимирующей их функции $T_{\text{зад par}}(\alpha, \rho)$, а также относительной погрешности аппроксимации δ – представлены на рис. 7.

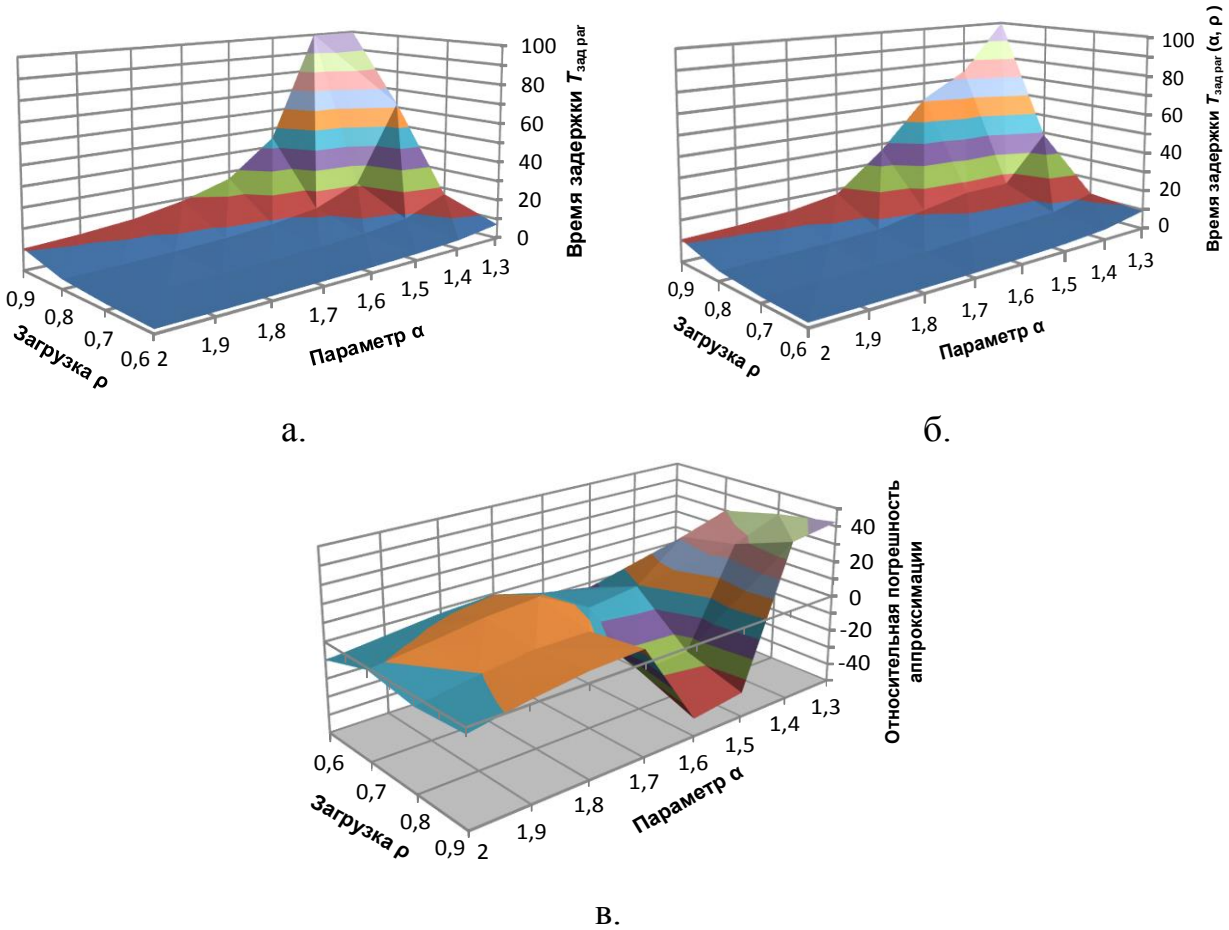



Рис. 7. Графические зависимости:
а. – исходные результаты имитационного моделирования, в соответствии с данными из таблицы 1;
б. – значение аппроксимирующей функции $T_{\text{зад par}}(\alpha, \rho)$ в соответствии с выражением (10);
в. – относительная погрешность аппроксимации в соответствии с выражением (11).

При этом погрешность аппроксимации определялась по выражению:

$$\delta(\alpha, \rho) = \frac{T_{\text{зад par}}(\alpha, \rho) - T^*_{\text{зад par}}(\alpha, \rho)}{T^*_{\text{зад par}}(\alpha, \rho)} \cdot 100\%, \quad (11)$$

где значение $T_{\text{зад par}}(\alpha, \rho)$ определяется по формуле (10), а значение $T_{\text{зад par}}{}^*(\alpha, \rho)$ определяется из таблицы 1 для одних и тех же значениях параметра α и загрузки ρ.

## Вывод

Проведенные исследования показали, что мультимедийный трафик обладает свойством структурной сложности. Наличие этого свойства ведет к существенному снижению своевременности обслуживания трафика в узлах сети. Оценка снижения своевременности обслуживания сложного трафика в узлах сети была проведена на основе имитационного моделирования. Для моделирования обслуживания трафика в узле использовались модели систем массового обслуживания *M*/*M*/1 (для простого трафика) и *Pa*/*M*/1 (для трафика со сложной структурой, которая задавалась параметром α Парето-распределения). В работе проведена двухуровневая аппроксимация результатов имитационного моделирования, которая позволила получить аналитическое выражение (10) для зависимости своевременности обслуживания трафика от уровня загрузки узла и уровня сложности трафика.

Полученное аналитическое выражение (10) для оценки своевременности обслуживания сложного трафика может быть использовано при решении прикладных задач проектирования и анализа сетей связи при передаче мультимедийного трафика в условиях высокой загрузки сети. Кроме того, данное выражение может быть использовано для проверки достоверности результатов ранее проведенных исследований, основанных на аналитических методах оценки качества обработки заявок в системах массового обслуживания.

Исследования своевременности обслуживания сложного трафика в узлах сети выполнены при государственной поддержке РФФИ инициативного научного проекта № 13-07-97518 и поддержке Департамента приоритетных направлений науки и технологий Минобрнауки РФ – грантом Президента РФ № МК-755.2012.10.

**Приложение 1.**

Листинг программы имитационной модели M/M/1 в среде GPSS World

```
; Блок описания используемых переменных
VrDelta   TABLE   X$Delta,0,1,60  ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                  ; времени между пакетами трафика
                                  ; с экспоненциальным распределением
          INITIAL X$Time,0        ; Установить начальное значение "Time",
                                  ; равным нулю
VrObsl    TABLE     MP2,0,1,60    ; Гистограмма времени обслуживания пакетов
Moj       EQU       4.33          ; МОЖ значения интервала времени между
                                  ; очередными пакетами трафика
```

```
T_obsl    EQU        1             ; Среднее время обслуживания пакета
Fun       VARIABLE (AC1-X$Time)    ; Функция вычисления значений интервалов
                                   ; времени "Delta" между очередными пакетами
                                   ; (разность абсолютного модельного времени
                                   ; и сохраненного значения ячейки "Time")
; Блок генерации и обслуживания экспоненциального трафика
          GENERATE   (Exponential(17,0,Moj)); Генератор пакетов трафика
                                   ; с экспоненциальным распределением
          SAVEVALUE Delta,V$Fun    ; Сохранить в ячейку "Delta" значение,
                                   ; вычисленное по формуле "Fun"
          SAVEVALUE Time,AC1       ; Сохранить в ячейку "Time" значение, равное
                                   ; абсолютному модельному времени
          TABULATE  VrDelta        ; Сохранить вычисленное значение переменной
                                   ; "Delta" в таблицу "VrDelta" для построения
                                   ; гистограммы распределения
          MARK     2               ; Сохранить в ячейку "2" значение абсолютного
                                   ; модельного времени
          QUEUE    Ocher           ; Занять одно место в буфере "Ocher"
          SEIZE    OKU             ; Занять устройство "OKU"
          DEPART   Ocher           ; Освободить одно место в буфере "Ocher"
          ADVANCE  (Exponential(45,0,T_obsl)) ; Среднее время обслуживания пакета
                                   ; в устройстве "OKU", равное T_obsl
          RELEASE   OKU            ; Освободить устройство "OKU"
          SAVEVALUE 1,MP2          ; Сохранить в ячейку "1" значение разности
                                   ; между абсолютным модельным временем
                                   ; и значением, сохраненным в ячейке "2"
          TABULATE  VrObsl         ; Сохранить в таблицу "VrObsl" значение
                                   ; полученной разности
          TERMINATE  1             ; Вывести из системы обслуженный пакет
          START 1000000            ; Обслужить 1 млн. пакетов
```

## Приложение 2.

## Листинг программы имитационной модели Pa/M/1 в среде GPSS World

```
; Блок описания используемых переменных
VrDelta   TABLE    X$Delta,0,1,60  ; Гистограмма распределения значений интервалов
                                   ; времени между пакетами Парето-трафика
          INITIAL  X$Time,0        ; Установить начальное значение "Time",
                                   ; равным нулю
VrObsl    TABLE      MP2,0,1,60    ; Гистограмма времени обслуживания пакетов
VrOcher   QTABLE     Ocher,0,1,70  ; Гистограмма времени нахождения пакетов
                                   ; в очереди к обслуживанию
Alpha     EQU      1.0001          ; Параметр формы распределения Парето
k         EQU      1               ; Коэффициент масштаба распределения Парето
T_obsl    EQU      1               ; Среднее время обслуживания пакета
Fun       VARIABLE (AC1-X$Time)    ; Функция вычисления значений интервалов
                                   ; времени "Delta" между очередными пакетами
                                   ; (разность абсолютного модельного времени
                                   ; и сохраненного значения ячейки "Time")
; Блок генерации и обслуживания трафика Парето
          GENERATE (k#(Uniform(1,0,1)+1E-6#Uniform(1,0,1))^(-1/Alpha))
                                   ; Трафик с Парето распределением
                                   ; интервалов времени между пакетами с шагом
                                   ; дискретизации ε=10^-12
          SAVEVALUE Delta,V$Fun    ; Сохранить в ячейку "Delta"
                                   ; значение, вычисленное по формуле "Fun"
          SAVEVALUE Time,AC1       ; Сохранить в ячейку "Time" значение, равное
                                   ; абсолютному модельному времени
          TABULATE  VrDelta        ; Сохранить вычисленное значение переменной
                                   ; "Delta" в таблицу "VrDelta" для построения
                                   ; гистограммы распределения
          MARK     2               ; Сохранить в ячейку "2" значение абсолютного
```

```
                          ; модельного времени
QUEUE    Ocher            ; Занять одно место в буфере "Ocher"
SEIZE    OKU              ; Занять устройство "OKU"
DEPART   Ocher            ; Освободить одно место в буфере "Ocher"
ADVANCE  (Exponential(45,0,T_obsl)) ; МОЖ времени обслуживания пакета
                          ;в устройстве "OKU", равное T_obsl
RELEASE   OKU             ; Освободить устройство "OKU"
SAVEVALUE 1,MP2           ; Сохранить в ячейку "1" значение разности
                          ; между абсолютным модельным временем
                          ; и значением, сохраненным в ячейке "2"
TABULATE  VrObsl          ; Сохранить в таблицу "VrObsl" значение
                          ; полученной разности
TERMINATE  1              ; Вывести из системы обслуженный пакет
START 1000000             ; Обслужить 1 млн. пакетов
```

## Литература

1. Платов В. В., Петров В. В. Исследование самоподобной структуры телетрафика беспроводной сети // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2004. № 3. С. 38-49.

2. Скуратов А. К. Статистический мониторинг и анализ телекоммуникационных сетей: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – М.: Государственный научно-исследовательский институт информационных технологий и телекоммуникаций «Информика», 2007. – 36 с.

3. Иванов И. П. Математические модели, методы анализа и управления в корпоративных сетях: Автореферат дис. … д-ра тех. наук. – М.: Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, 2010. – 34 с.

4. Алиев Т. И. Основы моделирования дискретных систем. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2009. – 363 с.

5. Буров А. А. Исследование влияния методов маршрутизации на качество обслуживания в мультисервисных сетях связи, функционирующих в экстремальных условиях: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, 2009. – 23 с.

6. Назаров А. Н., Сычев К. И. Модели и методы расчета показателей качества функционирования узлового оборудования и структурно-сетевых параметров сетей связи следующего поколения. – Красноярск: Изд-во ООО «Поликом», 2010. – 389 с.

7. Кучерявый Е. А. Управление трафиком и качество обслуживания в сети Интернет. – СПб.: Наука и техника, 2004. – 336 с.

8. Головко Н. И. Исследование моделей систем массового обслуживания в информационных сетях: Автореферат дис. … д-ра техн. наук. – Владивосток: Тихоокеанский государственный экономический университет, 2007. – 39 с.

9. Ложковский А. Г. Анализ и синтез систем распределения информации в условиях мультисервисного трафика: дис. ... д-ра техн. наук. – Одесса: Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, 2010. – 267 с.

10. Бахарева Н. Ф., Карташевский И. В., Тарасов В. Н. Анализ и расчет непуассоновских моделей трафика в сетях ЭВМ // Инфокоммуникационные технологии. 2009. Т. 7. № 4. С. 61-66.

11. Бахарева Н. Ф., Тарасов В. Н., Ушаков Ю. А. Обобщенная двумерная диффузионная модель массового обслуживания типа *GI*/*G*/1 // Телекоммуникации. 2009. № 7. С. 2-8.

12. Бахарева Н. Ф. Аппроксимативные методы и модели массового обслуживания для исследования компьютерных сетей: Автореферат дис. ... д-ра техн. наук. – Пенза: Пензенский государственный университет, 2011. – 36 с.

13. Тарасов В. Н., Бахарева Н. Ф., Горелов Г. А. Математическая модель трафика с тяжелохвостным распределением на основе системы массового обслуживания $H_2/M/1$ // Инфокоммуникационные технологии. 2014. Т. 12. № 3. С. 36-41.

14. Карташевский И. В., Буранова М. А. Влияние механизмов управления QoS на показатели качества обслуживания мультимедийного трафика сети Internet // T-comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2013. № 8. С. 54-60.

15. Агеев Д. В., Игнатенко А. А., Копылев А. Н. Методика определения параметров потоков на разных участках мультисервисной телекоммуникационной сети с учетом эффекта самоподобия // Проблеми телекомунікацій. 2011. № 3 (5). С. 18-37.

16. Шувалов В. П., Мирзакулова Ш. А. Моделирование процесса обслуживания самоподобного трафика коммутатором второго уровня // T-comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2014. № 8. С. 102-105.

17. Линец Г. И. Методы структурно-параметрического синтеза, идентификации и управления транспортными телекоммуникационными сетями для достижения максимальной производительности: Автореф. дис. … д-ра техн. наук. Ставрополь: Северо-Кавказский федеральный университет, 2013. – 34 с.

18. Пастухов А. С., Иванов Ю. А. Оценка взаимного влияния самоподобных Internet и видеотрафика при передаче в стандарте DVB/IP/MPEG-4 по гибридным сетям спутниковой связи // Вестник Чувашского университета. 2008. № 2. С. 160-169.

19. Алиев Р. Т., Король В. В. Анализ характеристик мультимедийного трафика в локальных вычислительных сетях // Имитационное моделирование. Теория и практика. 2003. Т. 1. С. 45-49.

20. Маколкина М. А. Разработка и исследование моделей оценки качества передачи видео в IP-сетях: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2014. – 187 с.

21. Ушанев К. В. Имитационные модели системы массового обслуживания типа *Pa*/*M*/1, $H_2/M/1$ и исследование на их основе качества обслуживания трафика со сложной структурой // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 217-251.

22. Задорожный В. Н., Долгушин Д. Ю., Юдин Е. Б. Аналитико-имитационные методы решения актуальных задач системного анализа больших сетей / Под ред. В. Н. Задорожного – Омск: Издательство ОмГТУ, 2013. – 324 с.

23. Будко П. А., Рисман О. В. Многоуровневый синтез информационно-телекоммуникационых систем. Математические модели и методы оптимизации: Монография. – СПб.: ВАС, 2011. - 476 с.

24. Петров В. В. Структура телетрафика и алгоритм обеспечения качества обслуживания при влиянии эффекта самоподобия: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», 2004. — 199 с.

25. Осин А. В. Влияние самоподобности речевого трафика на качество обслуживания в телекоммуникационных сетях: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.13. – М.: Московский государственный университет сервиса, 2005. – 164 с.

26. Соколов Н. А. Задачи перехода к сети связи следующего поколения: Автореферат дис. … д-ра техн. наук. – СПб.: Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2006. – 36 с.

27. Шелухин О. И., Осин А. В. Влияние самоподобности трафика на оптимизацию параметров телекоммуникационных сетей // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2007. Т. 3. № 1. С. 55-59.

28. Бахарева Н. Ф., Ушаков Ю. А. Управление нагрузкой на сети ЭВМ распознаванием и моделированием трафика // Инфокоммуникационные технологии. 2008. Т. 6. № 3. С. 56-62.

29. Малофей О. П., Фомин Л. А., Родионов В. В., Ряднов Д. С. Моделирование самоподобного трафика при построении сетей NGN // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2009. № 11. С. 176-186.

30. Сычев К. И., Умнов А. Е. Способ обеспечения качества обслуживания разнородного трафика в узлах коммутации мультисервисных сетей связи на основе динамических приоритетов // T-comm – Телекоммуникации и Транспорт. 2012. № 7. С. 206-210.

31. Макаренко С. И. Анализ математических моделей информационных потоков общего вида и степени их соответствия трафику сетей интегрального обслуживания // Вестник Воронежского государственного университета. 2012. Т. 8. № 8. С. 28-35.

32. Кучук Г. А. Учет фрактальных свойств пульсирующего трафика // Материалы I Международной научно-технической конференции «Инфотелекоммуникационные технологии в науке, производстве и образовании». URL: http://www.selfsimilar.narod.ru/kuchuk1.pdf (дата обращения: 30.11.2015).

33. Федорова М. Л., Леденева Т. М. Об исследовании свойства самоподобия трафика мультисервисной сети // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2010. № 1. С. 46-54.

34. Новиков Е. А., Павлов А. Р., Зиннуров С. Х. Метод оперативного планирования частотно-временного ресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений // Авиакосмическое приборостроение. 2014. № 5. С. 14-23.

35. Новиков Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом

запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2 (69). С. 79-86.

36. Новиков Е. А., Косяков Е. Н., Павлов А. Р. Динамическое резервирование радиоресурса в сетях спутниковой связи при передаче самоподобного трафика // Труды Научно-исследовательского института радио. 2014. № 2. С. 49-60.

37. Жуков С. Е., Новиков Е. А., Павлов А. Р. Метод динамического распределения радиоресурса ретранслятора в сетях спутниковой связи с учетом неоднородности трафика и запаздывания при управлении // Труды Научно-исследовательского института радио. 2014. № 1. С. 74-80.

38. Новиков Е. А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 3 (15). С. 62-69.

39. Новиков Е. А. Применение моделей структурной динамики при решении задачи распределения частотно-временного ресурса сети спутниковой связи на основе стандарта DVB-RCS // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3 (64). С. 78-83.

## References

1. Platov V. V., Petrov V. V. Issledovanie samopodobnoj strukturi teletrafika besprovodnoj seti [Self-Similar Structure Research of the Wireless Network teletraffic]. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2004, no 3. pp. 38-49 (In Russian).

2. Skuratov A. K. *Statisticheskii monitoring i analiz telekommunikacionnykh setei.* Diss. doct. tehn. nauk [Statistical Monitoring and the Analysis of Telecommunication Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Moscow, State Research Institute of Information Technologies and Telecommunications «Informika», 2007. – 36 c (In Russian).

3. Ivanov I. P. *Matematicheskie modeli, metody analiza i upravleniia v korporativnykh setiakh.* Diss. doct. tehn. nauk [Mathematical Models, Methods of the Analysis and Management in Corporate Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Moscow, Moscow State Technical University named after N. E. Bauman, 2010. 34 p. (In Russian).

4. Aliev T. I. *Osnovy modelirovaniia diskretnykh system* [Bases of Modeling of Discrete Systems]. Saint Petersburg, Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics Publ., 2009. 363 p. (In Russian).

5. Burov A. A. *Issledovanie vliianiia metodov marshrutizacii na kachestvo obslujivaniia v multiservisnikh seiakh sviazi, funkcioniruyuschikh v ekstremalnykh usloviiakh.* Diss. kand. tehn. nauk [Research of Routing Methods Influence on a Quality of Service at the Multiservice Communication Networks Functioning on Extreme Conditions. Extended Abstract Ph. D. Thesis]. Novosibirsk, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, 2009. 23 p. (In Russian).

6. Nazarov A. N., Sychev K. I. *Modeli i metody rascheta pokazatelej kachestva funkcionirovanija uzlovogo oborudovanija i strukturno-setevyh parametrov setej*

*svjazi sledujushhego pokolenija* [The Models and the Methods of Measuring of Quality Indicators of Nodal Equipment Functioning and Network Structural Parameters of Next Generation Networks]. Krosnoyarsk, Polykom Publ., 2010. 389 p. (In Russian).

7. Kucheryavii E. A. *Upravlenie trafikom i kachestvo obsluzhivanija v seti Internet* [Traffic Management and the Quality of Service on the Internet]. Saint-Petersburg, Science and Technology Publ., 2004. 336 p. (In Russian).

8. Golovko N. I. *Issledovanie modelej system massovogo obslujivaniia v informacionnykh setiakh.* Diss. doct. tehn. nauk [Models Research of Queue Systems at Information Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Vladivostok, The Pacific State Economic University, 2007. 39 p. (In Russian).

9. Lojkovskij A. G. *Analiz i sintez system raspredeleniia informacii v usloviiakh multiservisnogo trafika.* Diss. doct. tehn. nauk [The Analysis and Synthesis of Information Distribution Systems in the Conditions of Multiservice Traffic. Dr. habil. Thesis]. Odessa, Odessa National Academy of Telecommunications named after A. S. Popov, 2010. 267 p. (In Russian).

10. Bakhareva N. F., Kartashevskii I. V., Tarasov V. N. The Analysis and Calculation of Not-Poisson Models of the Traffic in Computer Networks. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2009, vol. 7, no. 4, pp. 61-66 (In Russian).

11. Bakhareva N. F., Tarasov V. N., Ushakov U. A. Obobshhennaja dvumernaja diffuzionnaja model' massovogo obsluzhivanija tipa [The Generalized Two-Dimensional Diffusion Waiting Line Model of Type *GI*/*G*/1]. *Telecommunications*, 2009, no. 7, pp. 2-8 (In Russian).

12. Bakhareva N. F. *Approksimativnie metody I modeli massovogo obslujivaniia dlia issledovaniia kompyuternykh setei*. Diss. doct. tehn. nauk [Approximation Methods and Queue Models for Research of Computer Networks. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Penza, Penza State University, 2011. 36 p. (In Russian).

13. Tarasov V. N., Bakhareva N. F., Gorelov G. A. Mathematical Model of Traffic with Heavy-Tailed Distributions based Queueing $H_2/M/1$. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2014, vol. 12, no. 3, pp. 36-41 (In Russian).

14. Kartashevskii I. V., Buranova M. A. Vliianie mekhanizmov upravleniia QoS na pokazateli kachestva obsluzhivaniia mul'timediinogo trafika seti Internet [Influence of Mechanisms of Management QoS on Indicators of Quality of Service of the Multimedia Traffic of Network Internet]. *T-comm – Telecommunications and Transport*, 2013, no. 8, pp. 54-60 (in Russian).

15. Ageev D. V., Ignatenko A. A., Kopylev A. V. Metodika opredelenija parametrov potokov na raznyh uchastkah mul'tiservisnoj telekommunikacionnoj seti s uchetom jeffekta samopodobija [Technique of Determination of Parameters of Streams on Different Sites of a Multiservice Telecommunication Network taking into Account Effect of Self-Similarity]. *Problemy telekomunikatsiy*, 2011, vol. 5, no. 3, pp. 18-37 (In Russian).

16. Shuvalov V. P., Mirzakulova S. A. Modeling of Self-Similar Traffic Processing by L2 Switch. *T-comm – Telecommunications and Transport*, 2014, no. 8, pp. 102-105 (In Russian).

17. Linec G. I. *Metody strukturno-parametricheskogo sinteza, identifikacii i upravlenija transportnymi telekommunikacionnymi setjamin dlja dostizhenija maksimal'noj proizvoditel'nosti.* Diss. dokt. tehn. nauk [The Methods of Structural Parametric Synthesis, Identification and Control of Transport Telecommunication Networks for Achievement of the Maximum Productivity. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Stavropol, Northern-Caucasus State University, 2013. 34 p. (In Russian).

18. Pastukhov A. S., Ivanov Yu. A. Ocenka vzaimnogo vliianiia samopodobnykh Internet i videotrafika pri peredache v standarte DVB/IP/MPEG-4 po gibridnim setiam sputnikovoi sviazi [Interference estimation of self-similar internet and video traffics on transmition throw hybrid satellite networks by DVB/IP/MPEG-4 standard]. *Proceedings of Chuvash State University*, 2008, no. 2, pp. 160-169 (In Russian).

19. Aliev R. T., Korol V. V. Analiz kharakteristik mul'timediinogo trafika v lokal'nykh vychislitel'nykh setiakh [The Analysis of Traffic Characteristics of Local Area Networks]. *Imitating Simulation. Theory and Practice*, 2003, vol. 1, pp. 45-49 (in Russian).

20. Makolkina M. A. *Razrabotka i issledovanie modelei otsenki kachestva peredachi video v IP-setiakh.* Diss. kand. tehn. nauk [Working Out and Research of Models of an Estimation of Quality of Transfer of Video in IP-Networks. Ph. D. Thesis]. Saint-Petersburg, Saint-Petersburg State University of Telecommunications by Professor M.A. Bonch-Bruevich, 2014. 187 p. (in Russian).

21. Ushanev K. V. Simulation Models of Queuing Systems of Type *Pa*/*M*/1, $H_2$/*M*/1 and Research on the Basis of their Quality of Service Traffic with a Complicated Structure. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 217-251 (in Russian).

22. Zadorozhnii V. N., Dolgushin D. U., Udin E. B. *Analitiko-imitatsionnye metody resheniia aktual'nykh zadach sistemnogo analiza bol'shikh setei* [Analytical-Imitating Methods of the Decision of Actual Problems of the System Analysis of the Big Networks]. Omsk, Omsk State Technical University Publ., 2013. 324 p. (in Russian).

23. Budko P. A., Risman O. V. *Mnogourovnevij sintez informacionno-telekommunikacionnikh sistem. Matematicheskie modeli i metody optimizacii* [Multi-Level Synthesis of Information Telecommunication Systems. Mathematical Models and Methods of Optimization. Treatise]. Saint-Petersburg, Military Academy of the Signal Corps Publ., 2011. 476 p. (in Russian).

24. Petrov V. V. *Struktura teletrafika i algoritm obespecheniia kachestva obsluzhivaniia pri vliianii effekta samopodobiia.* Diss. kand. tehn. nauk [Structure of the Teletraffic and Algorithm of Maintenance of Quality of Service at Influence of Effect of Self-Similarity. Ph. D. Thesis]. Moscow, National Research University "Moscow Power Engineering Institute", 2004. 199 p. (in Russian).

25. Osin A. V. *Vliianie samopodobnosti rechevogo trafika na kachestvo obsluzhivaniia v telekommunikatsionnykh setiakh*. Diss. kand. tehn. nauk [Influence of Self-Similitude of the Speech Traffic on Quality of Service in Telecommunication

Networks. Ph. D. Thesis]. Moscow, Moscow State Academy of Consumer Services, 2005. 164 p. (in Russian).

26. Sokolov N. A. *Zadachi perekhoda k seti sviazi sleduyuschego pokoleniia.* Diss. doct. tehn. nauk [Transition Problems to a Next Generation Network. Extended Abstract of Dr. habil. Thesis]. Saint-Petersburg, The Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 2006. 26 p. (In Russian).

27. Shelukhin O. I., Osin A. V. Vliianie samopodobnosti trafika na optimizaciyu parametrov telekommunikacionnykh setei [Self-Similitude Influence to the Traffic Optimization Parameters of Telecommunication Networks]. *Electrical and data processing facilities and systems*, 2007, vol. 3 no 1. pp. 55-59 (In Russian).

28. Bakhareva N. F., Ushakov U. A. Traffic Recognition and Simulation for the Purpose of Network Utilization Management. *Infokommunikacionnye Tehnologii*, 2008, vol. 6, no. 3, pp. 56-62 (In Russian).

29. Malofej O. P., Fomin L. A., Rodionov V. V., Rjadnov D. S. Self-Similar Traffic Model Analysis in NGN Nets Formation. *Izvestiya Southern Federal University. Engineering Sciences*, 2009, no. 11, pp. 176-186 (In Russian).

30. Sychev K. I., Umnov A. E. Method of Quality Assurance of Service of the Heterogeneous Traffic in Switching Nodes of Next Generation Networks on the Basis of Dynamic Priorities. *T-comm – Telecommunications and Transport*, 2012, no. 7, pp. 206-210 (In Russian).

31. Makarenko S. I. Analyzing of Mathematical Models of General type Data Streams and Degree of their Conformity to Integral Service Net Traffic. *Proceedings of Voronezh State University*, 2012, vol. 8, no. 8, pp. 28-35.

32. Kuchuk G. A. Uchet fraktal'nykh svoistv pul'siruiushchego trafika [The Account of Fractal Properties of the Pulsing Traffic]. *Materiali I Mezhdunarodnoi nauchno-technicheskoi konferencii "Infotelekommunikacionnie technologii v nauke, proizvodstve i obrazovanii"* [The Materials of the 1st International Scientific and Technical Conference "Infotelecommunication Technologies in a Science, Manufacture and Formation"]. Available at: http://www.selfsimilar.narod.ru/kuchuk1.pdf (accessed 30 November 2015) (in Russian).

33. Fedorova M. L., Ledeneva T. M. About Research of Property of Self-Similarity of the Traffic of a Multiservice Network. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Systems analysis and information technologies*, 2010, no. 1, pp. 46-54 (in Russian).

34. Novikov E. A., Pavlov A. R., Zinnurov S. H. Method of operative planning of the satellite repeater's time-and-frequency resource under non stationary ingress flow. *Aerospace Instrument Making*, 2014, no. 5, pp. 14-23 (in Russian).

35. Novikov E. A. Operative distribution of satellite repeater radio resource in terms of non-stationary ingress flow with account of time lagged control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2014, vol. 69, no 2, pp. 79-86 (in Russian).

36. Novikov E. A., Kosyakov E. N., Pavlov A. R. Dynamic reservation of a radio resource in satellite communication networks by transfer of the self-similar traffic. *Trudi NIIR*, 2014, no. 2, pp. 49-60 (in Russian).

37. Zhukov S. E., Novikov E. A., Pavlov A. R. Method of radio resource dynamic distribution in networks of satellite communication taking into account heterogeneity of a traffic and delay at management. *Trudi NIIR*, 2014, no. 1, pp. 74-80 (in Russian).

38. Novikov E. A. Estimate of the satellite repeater's capacity under radio resource's redundancy with feed-forward. *Radio and telecommunication systems*, 2014, vol. 15, no. 3, pp. 62-69 (in Russian).

39. Novikov E. A. Using of structural dynamics models in tasks of time-frequency source distribution in satellite communication system based on DVB-RCS standard. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2013, vol. 64, no 3, pp. 78-83 (in Russian).

**Статья поступила 15 декабря 2015 г.**

## Информация об авторах

*Ушанев Константин Владимирович* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: передача и обработка трафика со сложной и самоподобной структурой. E - mail: stan_007@mail.ru

*Макаренко Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E - mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13.

---

# The Timeliness Indicators of Traffic Service in Queue Systems *Pa*/*M*/1 Based on Approximation of Imitating Modeling Results

K. V. Ushanev, S. I. Makarenko

***Problem statement:*** *the volume of the multimedia traffic which is pitched through telecommunication networks is grows. Thus the multimedia traffic possesses property of the difficult structural. This property reduces timeliness of service of the traffic in network knots. These facts do actual research of timeliness of service of the traffic in network nodes.* ***The article purpose.*** *The analysis of timeliness for service of difficult traffic in network nodes on basis simulation modeling and approximation of the received results is the purpose of this article.* ***Used methods.*** *Models of queue systems M/M/1 (for the simple traffic) and Pa/M/1 (for traffic with difficult structure) have been used for modeling of service of traffic in network node. Packet delay time in node model has been used as meaning of timeliness of traffic service. Simulation modeling has been selected as a research method. The environment imitative modeling GPSS World has been selected as research toolkit. Two-level approximation for results of simulation modeling has been used for make analytical expressions for the analysis of dependence of timeliness of traffic service from level of node loading and difficult traffic level.* ***Novelty.*** *Analytical expression for meaning of timeliness of service of difficult traffic simultaneously considering both loading level of node, and complexity traffic level are novelty of paper.* ***Results and practical relevance.*** *Analytical expression for*

*estimation of timeliness of difficult traffic service which was received in this article. That expression can be used at the decision of applied tasks of designing and analysis of a communication network. Especially for a communication network with transmission of the multimedia traffic and there are conditions of high loading is conducted. Besides, this expression can be used for check reliability of results before led researches based on analytical valuation methods of quality of service in queue systems.*

***Key words:*** *the traffic, Pareto distribution, traffic processing, package switching.*

## Information about Authors

*Konstantin Vladimirovich Ushanev* – Doctoral Candidate. The Postgraduate Student of the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: the transmission and servicing of the complicated structure traffic and self-similar structure traffic. E-mail: stan_007@mail.ru

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E–mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

УДК 004.82

# Модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт

Федулов А. С., Борисов В. В.

***Постановка задачи:*** *нечеткие когнитивные карты предназначены для формализации, анализа и моделирования проблем, слабоструктурированных систем и процессов. Нечеткие реляционные карты предоставляют расширенные возможности для решения этих проблем в условиях неопределенности. Особый интерес представляет использование этих карт для анализа и моделирования системной динамики, что в условиях нечеткого задания параметров и механизма распространения влияний приводит к необходимости решения проблем увеличения неопределенности и выхода нечетких значений концептов за диапазоны базовых множеств.* ***Целью работы*** *является разработка и исследование моделей системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт, обеспечивающих сохранение полностью нечеткого представления результатов на всех этапах моделирования при недопущении постоянного возрастания неопределенности и выхода нечетких значений концептов за диапазоны базовых множеств.* ***Используемые методы:*** *методы теорий нечетких множеств, нечетких отношений, нечетких вычислений и нечеткого когнитивного моделирования.* ***Новизна****: предложенные модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт характеризуются элементами новизны за счет использования устойчивых к возрастанию неопределенности операций над нечеткими числами и отношениями, что позволяет обеспечить: полностью нечеткое представление значений концептов на всех этапах моделирования динамики; принадлежность результирующих значений и приращений концептов к семейству нечетких чисел; невыход нечетких значений концептов за их носители; естественный характер агрегирования нечетких значений концептов.* ***Результат****: использование предлагаемых моделей позволит повысить достоверность и качество анализа и моделирования проблем, слабоструктурированных систем и процессов в условиях неопределенности.* ***Практическая значимость****: представленные модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт предлагается использовать в качестве математического обеспечения для разработки программных средств анализа и моделирования проблем, слабоструктурированных систем и процессов.*

***Ключевые слова****: нечеткая реляционная когнитивная карта, нечеткие числа и отношения, модель системной динамики, слабоструктурированные системы и процессы.*

## Актуальность

Нечеткие когнитивные модели (карты) предназначены для формализации проблем, слабоструктурированных систем и процессов. Они широко используются для анализа и моделирования организационно-технических, социально-экономических и демографических процессов, интеллектуальной поддержки принятия решений, в инвестиционной и инновационной деятельности, в мультиагентных технологиях, в технологиях виртуальных миров и мультимедийных приложений [1-3].

Структура этих моделей представляется в виде нечетких ориентированных графов, вершины (концепты) которых являются системные факторы (параметры, переменные), а дуги – отношения влияния (причинно-следственные отношения) между ними. Существуют различные способы нечеткого описания концептов и отношений влияния, что приводит к разным типам нечетких когнитивных карт [4-7].

В работе [8] предложен тип нечетких реляционных когнитивных карт, предоставляющий расширенные возможности по реализации полностью нечеткого подхода при анализе и моделировании слабо структурированных систем и проблем. При этом особый интерес представляет использование этих карт для анализа и моделирования системной динамики, что в условиях нечеткого задания параметров и механизма распространения влияний приводит к необходимости решения проблем увеличения неопределенности и выхода нечетких значений концептов за диапазоны базовых множеств.

В статье решаются актуальные задачи обоснования модели и моделирования системной динамики на основе нечетких реляционных карт, направленные на решение указанных проблем.

## Постановка задачи

Для постановки задачи рассмотрим формализованное описание нечеткой реляционной когнитивной карты (НРКК).

Пусть значения концептов $K_i$, $i=1,...,N$ представлены соответствующими нечеткими множествами $\tilde{K}_i$, каждое из которых задано на своем универсальном множестве $X_i$ в виде совокупности упорядоченных пар $\tilde{K}_i=\{(\mu_{\tilde{K}_i}(x_i)/x_i)\}$, где степень $\mu_{\tilde{K}_i}(x_i)$ – степень принадлежности, $x_i$ к нечеткому множеству $\tilde{K}_i$, $\mu_{\tilde{K}_i}(x_i): X_i \to [0,1]$.

Отношения влияния между концептами $K_i$ и $K_j$ $i=1,...,N$, $j=1,...,N$, задаются нечеткими бинарными отношениями $\tilde{R}_{ij}$ между соответствующими этим концептам нечеткими множествами $\tilde{K}_i$ и $\tilde{K}_j$, $\tilde{R}_{ij}:(x_i, x_j) \to [0,1]$, $x_i \in X_i$, $x_j \in X_j$. То есть, $\tilde{R}_{ij}$ ставит в соответствие каждой паре элементов $(x_i, x_j) \in X_i \times X_j$ степень принадлежности $\mu_{\tilde{R}_{ij}}(x_i, x_j) \in [0,1]$.

Совокупность же отношений влияния между всеми концептами НРКК задается матрицей нечетких бинарных отношений (МНБО):

$$\tilde{\mathbf{M}} = \begin{Vmatrix} \tilde{R}_{11} & \tilde{R}_{12} & ... & \tilde{R}_{1N} \\ \tilde{R}_{21} & \tilde{R}_{22} & ... & \tilde{R}_{2N} \\ ... & ... & ... & ... \\ \tilde{R}_{N1} & \tilde{R}_{N2} & ... & \tilde{R}_{NN} \end{Vmatrix}.$$

Причем, каждое нечеткое отношение $\tilde{R}_{ij}$ из МНБО рассматривается как нечеткое отображение нечеткого множества $\tilde{K}_i$ (значения концепта-источника $K_i$) на нечеткое множество $\tilde{K}_j$ (на значение концепта-приемника влияния $K_j$) [9].

При рассмотрении НРКК в виде модели системной динамики в ней могут быть выделены, во-первых, концепты, на которые подается внешнее воздействие, во-вторых, концепты, состояние которых оценивается в процессе

моделирования модели, в-третьих, внутренние концепты. В общем случае внешние воздействия и могут применяться ко всем концептам НРКК.

Одна из основных проблем нечетких моделей динамики заключается в том, что в процессе нечетких итерационных вычислений имеется тенденция к увеличению неопределенности результатов, что затрудняет, а иногда и делает невозможным их интерпретацию. Сопутствующая проблема – выход нечетких значений концептов за пределы заданного диапазона базовых множеств.

В работе [8] предложена модель динамики НРКК, основанная на промежуточной (поэтапной) дефаззификации (приведении к четкости) значений концептов. Однако дефаззификация, позволяющая «свернуть» неопределенность в одноточечное нечеткое множество, приводит к потере информации.

Поэтому постановка задачи заключается разработке моделей динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт, обеспечивающих сохранение полностью нечеткого представления результатов на всех этапах моделирования системной динамики при условиях недопущения постоянного возрастания неопределенности и выхода нечетких значений концептов за диапазоны базовых множеств.

## Модели системной динамики на основе когнитивных карт

Модель динамики когнитивной карты определяет механизм распространения влияний между ее концептами во времени. В практике когнитивного моделирования обычно используют синхронные модели динамики в дискретном времени, представленном в безразмерной шкале значений. Обычно используются простые модели инерционности передачи влияния между концептами, аналогичные транспортным задержкам. Задержка распространения влияния принимается одинаковой для всей когнитивной карты и определяется интервалом времени между двумя моментами дискретного времени. При непосредственном влиянии концептов друг на друга за один такт системного времени происходит передача этого влияния по дуге графа когнитивной карты – от концепта-источника к концепту-приемнику – и агрегирование отдельных влияний от концептов-источников на концепте-приемнике.

Основные разновидности динамических моделей, предложенные Ф. Робертсом в [10], для когнитивных карт могут быть интерпретированы таким образом:

$$K_j(t+1) = \sum_{i=1}^{n} w_{ij} K_i(t),$$

$$\Delta K_j(t+1) = \sum_{i=1}^{n} w_{ij} \Delta K_i(t),$$

$$\Delta K_j(t+1) = \sum_{i=1}^{n} w_{ij} K_i(t),$$

где $w_{ij}$ – вес влияния концепта $i$-го на $j$-й концепт, $w_{ij} \in [-1, 1]$; $n$ – число концептов, непосредственно влияющих на концепт $j$-й концепт; $K_i(t)$ и $\Delta K_i(t)$ – значение и приращение значения $i$-го концепта в момент времени $t$; $K_j(t+1)$ и $\Delta K_j(t+1)$ – значение и приращение значения $j$-го концепта в момент времени $(t + 1)$.

Для этих моделей динамики существует проблема выхода значений концептов за границы базового множества. Эта проблема решается по-разному.

Например, в работе [4] для этого используется нелинейная функция $f$, ограничивающая результат в диапазоне [0, 1] или [–1, 1]:

$$\tilde{K}_j(t+1) = f\left(\sum_{i=1}^{n} w_{ij}\,\tilde{K}_i(t)\right).$$

Для диапазона значений концептов [0, 1] в качестве функции $f$ наиболее часто используется сигмоидальная функция:

$$f(x) = \frac{1}{1+e^{-\lambda x}},\ \lambda > 0.$$

Получение результирующего нечеткого значения при этом осуществляется на основе принципа нечеткого обобщения Л. Заде.

Однако введенная таким образом в модель нелинейность усложняет анализ системной динамики и устойчивость.

В работе [5] передачу влияний между смежными концептами когнитивной карты предлагается осуществлять на основе операций $s$- и $t$-норм:

$$K_j(t+1) = \mathop{\mathrm{S}}_{i=1}^{n}\left(w_{ij}\,\mathrm{T}\,K_i(t)\right),$$

где S – $s$-норма; T – $t$-норма.

Существуют различные модели динамики нечетких когнитивных карт, в том числе, предложенные авторами данной статьи. Например, в работах [1, 8] предложена и исследована модель динамики для нечеткой реляционной когнитивной карты:

$$\tilde{K}_j(t+1) = \tilde{K}_j(t) \oplus \left(\mathop{\oplus}_{i=1}^{n}\left((\tilde{K}_i(t) - \tilde{K}_i(t-1)) \bullet \tilde{R}_{ij}\right)\right), \qquad (1)$$

$\tilde{K}_j(t+1)$, $\tilde{K}_j(t)$, $\tilde{K}_i(t)$, $\tilde{K}_i(t-1)$ – нечеткие значения концептов в соответствующие моменты времени, $\tilde{R}_{ij}$ – нечеткое отношение между концептами, «$\bullet$» – операция нечеткой композиции, «$\mathop{\oplus}_{i=1}^{N}$» – операция агрегирования отдельных нечетких влияний, «–» – операция приращения нечетких значений концептов, «$\oplus$» – операция нечеткого агрегирования совокупных влияний и предыдущего значения выходного концепта.

Выражение (1) представляет собой модель динамики для описываемой НРКК дискретной системы с обратными связями. Обратные связи являются «двухуровневыми»: во-первых, значение концепта в момент времени $(t+1)$ зависит от его же значения в момент $t$, что приводит к итерационным

вычислениям при моделировании; во-вторых, могут иметь место обратные связи, связанные с распространением влияния по НРКК.

В данной модели динамики НРКК в качестве операции агрегирования используется промежуточная дефаззификация (приведение к четкости) и операции сложения или вычитания нечетких значений с последующим ограничением результата. В работе [8] был решен вопрос об ограниченности диапазона значений концептов НРКК, однако не решена задача сохранения их нечеткого представления на всех этапах моделирования системной динамики.

## Модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт с использованием устойчивых к возрастанию неопределенности операций над нечеткими числами и отношениями

Пусть значения концептов и их приращения представлены в НРКК нечеткими числами на всех этапах моделирования.

Примечание. Под нечетким числом понимается нечеткое множество с выпуклой функцией принадлежности и конечным носителем.

Осуществим выбор операций над нечеткими числами и отношениями для моделей динамики НРКК с учетом следующих особенностей:

– сохранение полностью нечеткого представления значений концептов на всех этапах моделирования системной динамики;
– обеспечение принадлежности результирующих значений и приращений концептов к семейству нечетких чисел;
– обеспечение невыхода нечетких значений концептов за их носители;
– обеспечение естественного характера агрегирования.

На рис. 1 показан пример нечеткой реляционной когнитивной карты.

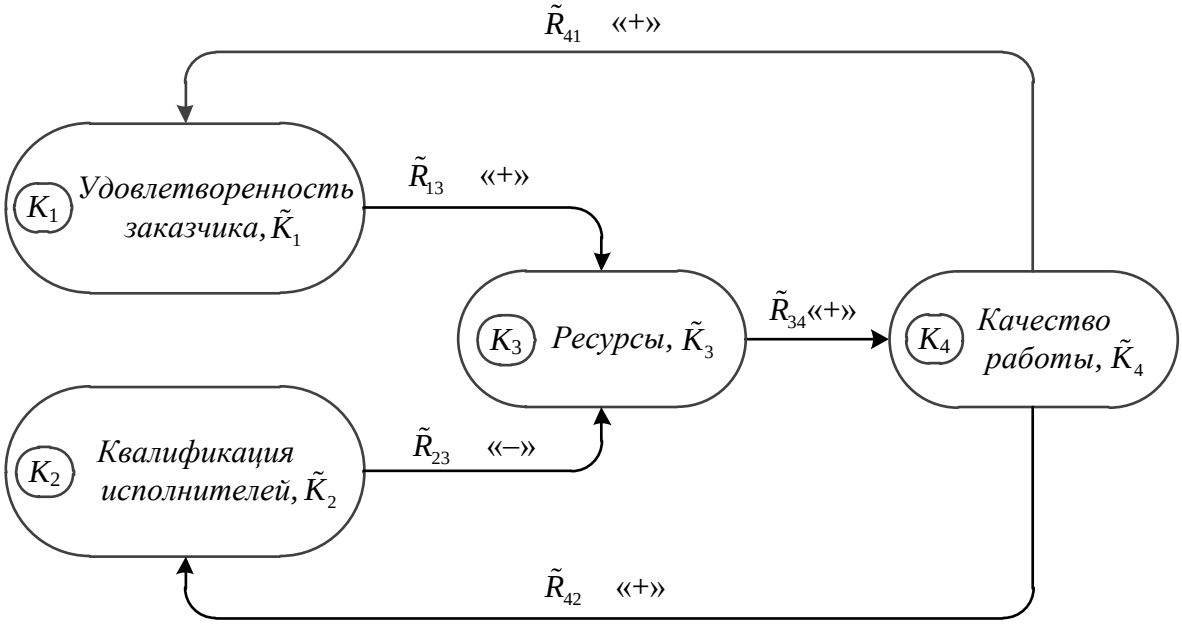



Рис. 1. Пример структуры нечеткой реляционной когнитивной карты

Для реализации моделей динамики НРКК требуется, с учетом указанных выше особенностей, обосновать, во-первых, операцию передачи влияния (нечеткого значения) от концепта-источника к концепту-приемнику, во-вторых, операцию агрегирования нечетких значений концептов.

Вопросы передачи влияния в НРКК рассмотрим на примере концептов $K_3$ и $K_4$. Для передачи влияния от концепта $K_3$ на концепт $K_4$ по соответствующей дуге используем операцию нечеткой композиции между нечетким значением $\tilde{K}_3$ концепта-источника $K_3$ (в виде нечеткого числа) и нечеткого отношения $\tilde{R}_{34}$. Результат композиции $\tilde{K}_4 = \tilde{K}_3 \bullet \tilde{R}_{34}$ представляет собой нечеткое множество с функцией принадлежности:

$$\mu_{\tilde{K}_4}(x_4) = \bigvee_{x_3 \in X_3} \mu_{\tilde{K}_3}(x_3) \wedge \mu_{\tilde{R}_{34}}(x_3, x_4), \quad x_3 \in X_3, x_4 \in X_4. \tag{2}$$

В случае если нечеткое отображение нечеткого числа $\tilde{K}_3$, реализуемое нечетким отношением $\tilde{R}_{34}$, является выпуклым, результатом этой операции будет также нечеткое число $\tilde{K}_4$ [11].

Примечание. Выпуклость нечеткого отображения – достаточно сильное условие. Поиск более слабых ограничений, накладываемых на нечеткие отношения, требует дополнительных исследований.

Рассмотрим теперь вопросы агрегирования нечетких значений концептов. Использование в качестве операции агрегирования нечетких влияний операций нечеткого сложения/вычитания над нечеткими числами выглядит наиболее естественным. Однако в этом случае носитель результирующего нечеткого числа, в общем случае, не ограничен. Это обуславливает необходимость проектирования специальной операции агрегирования, удовлетворяющей этому требованию.

В работе [12] предложена операция агрегирования нечетких чисел, устойчивая к возрастанию неопределенности. Рассмотрим вопросы использования этой операции агрегирования нечетких значений концептов на примере совместного воздействия концептов $K_1$ и $K_2$ на концепт $K_3$:

$$\tilde{K}_3 = \tilde{K}_1 \oplus \tilde{K}_2,$$

с функцией принадлежности

$$\mu_{\tilde{K}_3}(x_3) = \max\left( \mu_{\tilde{K}_1}\left( \frac{x_3 - m_{\tilde{K}_2}}{1 - x_3 \cdot m_{\tilde{K}_2}} \right), \mu_{\tilde{K}_2}\left( \frac{x_3 - m_{\tilde{K}_1}}{1 - x_3 \cdot m_{\tilde{K}_1}} \right) \right), \quad \forall x_3 \in X_3, \tag{3}$$

где $m_{\tilde{K}_1}$, $m_{\tilde{K}_2}$ – модальные значения нечетких чисел $\tilde{K}_1$ и $\tilde{K}_2$, соответственно.

В статье [13] доказано, что эта операция агрегирования нечетких чисел помимо устойчивости к возрастанию неопределенности, гарантирует ограниченность носителя результата, а также имеет характер агрегирования, качественно подобный операциям сложения/вычитания нечетких чисел.

Таким образом, использование операций (2) и (3) для моделей динамики НРКК позволяет реализовать свойство устойчивости к возрастанию неопределенности, сохраняя при этом свойство замкнутости нечетких значений концептов относительно семейства нечетких чисел.

## Пример моделирования динамики на основе нечеткой реляционной когнитивной карты

На показанной на рис. 1 НРКК имеется два контура с обратной связью:

– во-первых, с положительной обратной связью

$$K_1 \xrightarrow{\tilde{R}_{13}\ "+"} K_3 \xrightarrow{\tilde{R}_{34}\ "+"} K_4 \xrightarrow{\tilde{R}_{41}\ "+"} K_1,$$

– во-вторых, с отрицательной обратной связью

$$K_2 \xrightarrow{\tilde{R}_{23}\ "-"} K_3 \xrightarrow{\tilde{R}_{34}\ "+"} K_4 \xrightarrow{\tilde{R}_{42}\ "+"} K_2,$$

В контуре с положительной обратной связью при распространении влияния (с использованием описанных в предыдущем разделе операций) для каждой из пар смежных концептов увеличение нечеткого значения концепта-источника приводит к увеличению нечеткого значения концепта-приемника. И наоборот, уменьшение нечеткого значения концепта-источника ведет к уменьшению нечеткого значения концепта-приемника.

Во втором же контуре за счет отрицательного отношения влияния $\tilde{R}_{23}$ между концептами $K_2$ и $K_3$, увеличение нечеткого значения концепта-источника приводит к уменьшению нечеткого значения концепта-приемника, и, наоборот.

Моделирование может проводиться из некоторой начальной ситуации, определяемой начальными нечеткими значениями концептов без влияния на модель извне. Этот случай соответствует саморазвитию начальной ситуации. Если же нечеткие значения отдельных входных концептов подвержены внешним изменениям (или эти концепты соотнесены с этими воздействиями), то моделируемая система является управляемой. Моделирование может закончиться либо по достижению заданного момента дискретного времени, либо по достижении некоторой устойчивой или неустойчивой ситуации.

Проиллюстрируем обеспечение декларированных свойств при реализации системной динамики на основе НРКК с использованием предложенных операций для передачи влияния между концептами и агрегирования нечетких значений концептов.

Зададим нечеткие отношения влияния между концептами $K_i$ и $K_j$ в аналитическом виде:

$$\tilde{R}_{ij} = \exp(-(x_j + a_{ij}x_i)^2 / \sigma^2),$$

где $a_{ij}$ – параметр, определяющий наклон ядра нечеткого отношения $\tilde{R}_{ij}$ относительно осей базовых множеств.

Примем для всех нечетких отношений $\sigma^2 = 0,001$. Пусть $a_{13} = -0,7$, $a_{23} = 0,6$, $a_{34} = -0,4$ $a_{41} = -0,5$ $a_{42} = -0,6$ На рис. 2 представлен пример отношения $\tilde{R}_{42}$.

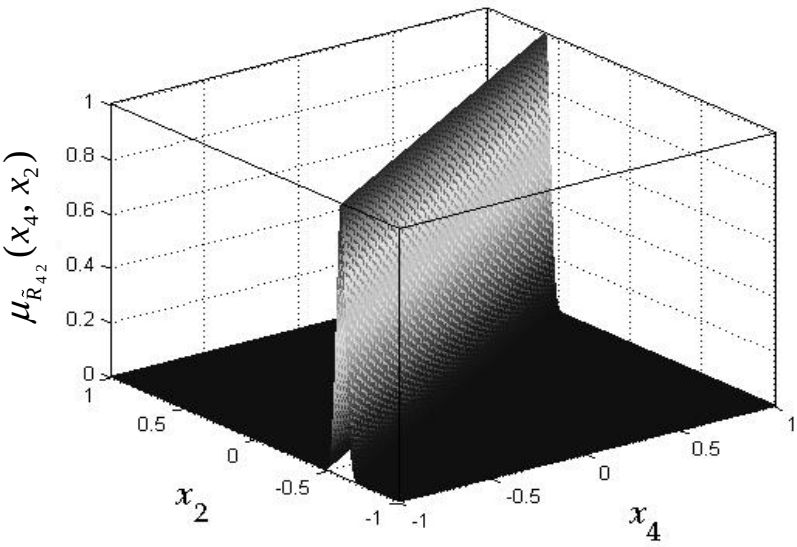



Рис. 2. Пример нечеткого отношения $\tilde{R}_{42}$ между концептами $K_4$ и $K_2$

Для иллюстрации динамического поведения НРКК рассмотрим случай импульсного входного сигнала, однократно изменяющего значения концептов в начальный момент времени.

Пусть в начальный момент времени значения концептов равны «нулю», т.е. степени принадлежности нечетких значений концептов:

$$\mu_{\tilde{K}_i}(x_i) = \begin{cases} 1, \text{ если } x_i = 0, \\ 0, \text{ иначе,} \end{cases} \quad x_i \in [-1, 1].$$

Входные воздействия зададим функциями принадлежности вида:

$$\mu_{\Delta\tilde{K}_i}(x_i) = \exp(-(x_i - b_i)^2 / \sigma^2),$$

где $b_i$ – среднее значение, $\sigma$ – параметр функции принадлежности, влияющий на «степень размытости» нечеткого числа.

Примем для всех функций принадлежности $\sigma_i^2 = 0,001$. Пусть нечеткие значения входных воздействий для соответствующих концептов НРКК на рис. 1, имеют следующий вид:

$$\mu_{\Delta\tilde{K}_1}(x_1) = \exp(-(x_1 - 0,8)^2 / 0,001), \quad \mu_{\Delta\tilde{K}_3}(x_3) = \exp(-(x_3 + 0,2)^2 / 0,001),$$

$$\mu_{\Delta\tilde{K}_2}(x_2) = \exp(-(x_2 - 0,2)^2 / 0,001), \quad \mu_{\Delta\tilde{K}_4}(x_4) = \exp(-(x_4 + 0,7)^2 / 0,001).$$

Определим нечеткие значения концептов в результате потактового моделирования на основе модели динамики (1) с использованием операций (2) и (3).

На рис. 3 показаны нечеткие значения концепта $K_1$, полученные на 64 эпохах имитационного моделирования.

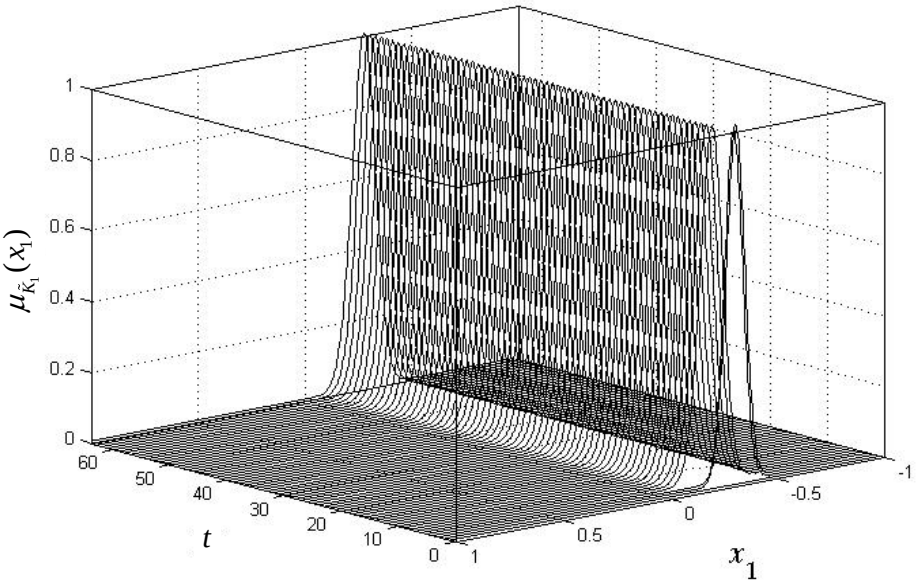



Рис. 3. Нечеткие значения концепта $K_1$ на 64 эпохах моделирования

Из рис. 3 видно, что происходит стабилизация (сходимость) нечетких значений концепта. Аналогичное поведение демонстрируют другие концепты.

Рассмотрим теперь моделирование с другой формой нечетких отношений между концептами. Пусть, например, нечеткое отношение $\tilde{R}_{23}$ имеет вид (см. рис. 4):

$$\tilde{R}_{ij} = \exp(-(x^3{}_j + a_{ij}x_i)^2 / \sigma^2).$$

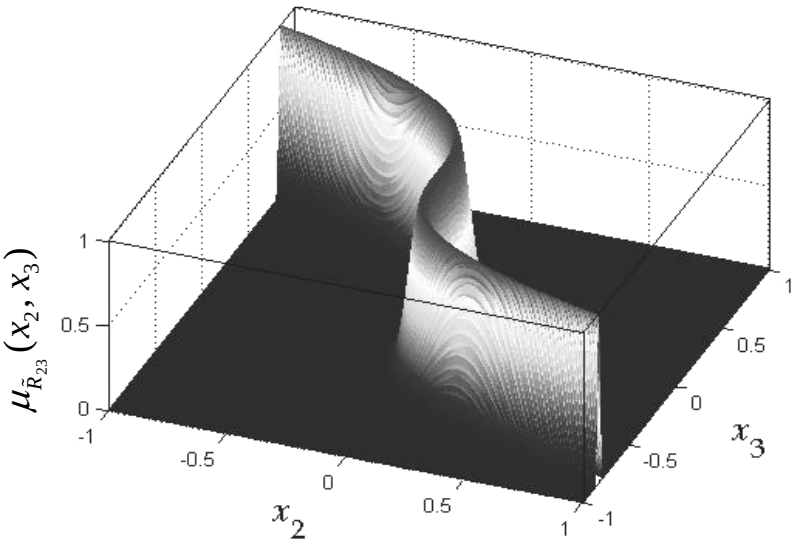



Рис. 4. Вид нечеткого отношения $\tilde{R}_{23}$

При сохранении прежних параметров по результатам 64 эпох имитационного моделирования нечеткие значения концепта $K_1$ примут вид, представленный на рис. 5.

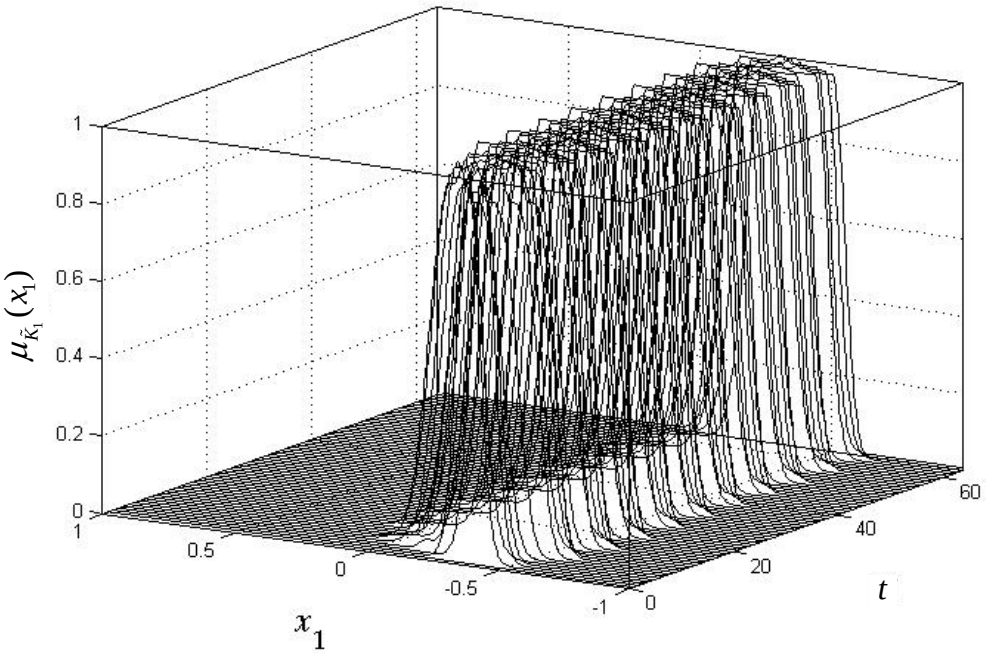



Рис. 5. Нечеткие значения концепта $K_1$ на 64 эпохах моделирования

Из рис. 5 видно, что в ограниченной области наблюдается колебательный процесс, поведение НРКК нестабильно.

Пусть теперь нечеткое отношение $\tilde{R}_{13}$ имеет вид, показанный на рис. 6.

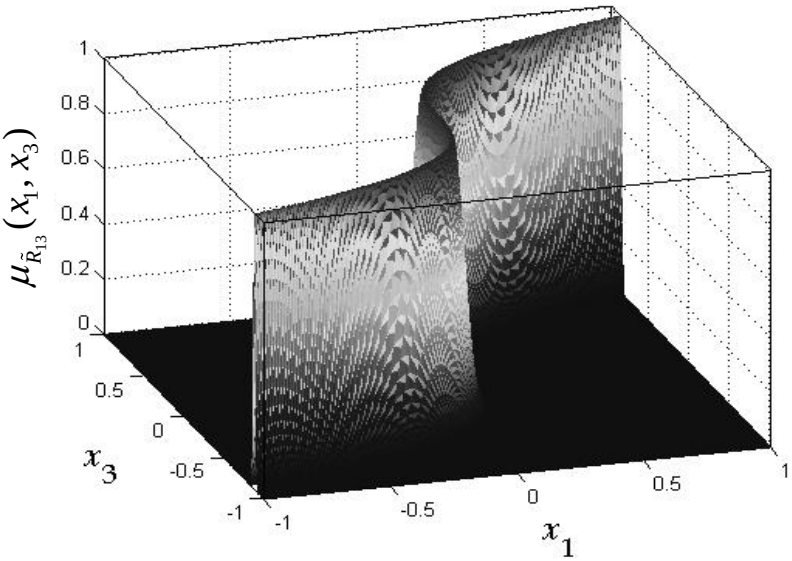



Рис. 6. Вид нечеткого отношения $\tilde{R}_{13}$

При сохранении прежних параметров по результатам 64 эпох имитационного моделирования нечеткие значения концепта $K_1$ примут вид, представленный на рис. 7.

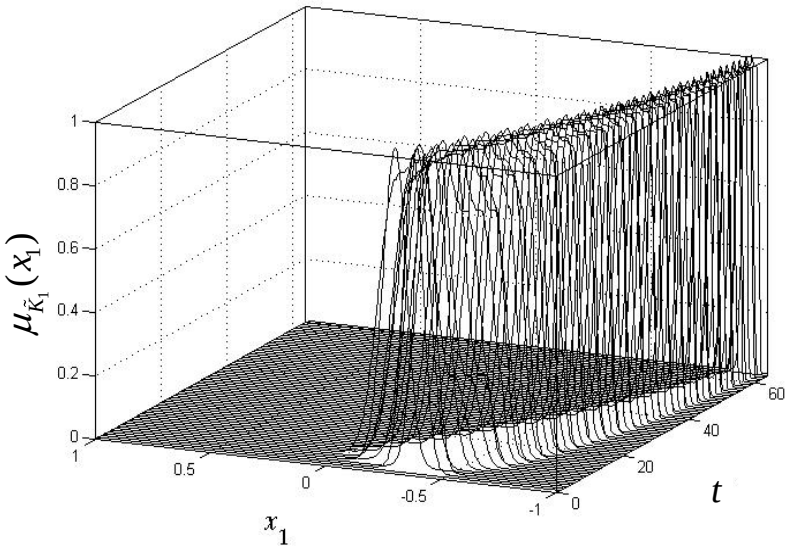



Рис. 7. Нечеткие значения концепта $K_1$ на 64 эпохах моделирования

Из рис. 7 видно, что нечеткие значения концепта $K_1$ стремятся к насыщению.

Таким образом, результаты моделирования системной динамики на основе нечетких реляционных карт с использованием предложенных операций для передачи нечеткого влияния по нечеткой реляционной когнитивной карте и агрегирования нечетких значений концептов позволили обеспечить:

– полностью нечеткое представление значений концептов на всех этапах моделирования системной динамики;
– принадлежность результирующих значений и приращений концептов к семейству нечетких чисел;
– невыход нечетких значений концептов за их носители;
– естественный характер агрегирования нечетких значений концептов.

Предложенный набор операций может быть использован для всех описанных моделей динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт.

## Выводы

Предложены модели системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных карт, использующие устойчивые к возрастанию неопределенности операции над нечеткими числами и отношениями. Это позволяет в процессе моделирования системной динамики решить задачи передачи нечетких влияний по модели и агрегирования нечетких значений концептов с учетом следующих особенностей: сохранение полностью

нечеткого представления значений концептов на всех этапах моделирования системной динамики; обеспечение принадлежности результирующих значений и приращений концептов к семейству нечетких чисел; обеспечение невыхода нечетких значений концептов за их носители; обеспечение естественного характера агрегирования.

Использование предлагаемых моделей системной динамики на основе нечетких реляционных когнитивных позволит повысить достоверность и качество анализа и моделирования проблем, слабоструктурированных систем и процессов в условиях неопределенности.

Представленные модели в дальнейшем предлагается использовать в качестве математического обеспечения для разработки программных средств анализа и моделирования проблем, слабоструктурированных систем и процессов.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 15-41-03259-р_центр_а.*

**Литература**

1. Борисов В. В., Круглов В. В., Федулов А. С. Нечеткие модели и сети. 2-е изд. М.: Горячая линия–Телеком, 2012. 284 с.

2. Захарова А. С., Глызин А. А. Нечеткое когнитивное моделирование слабоформализуемых систем и процессов // Фундаментальные исследования. 2014. № 9. С. 511-515.

3. Какатунова Т. В., Палюх Б. В. Нечеткая когнитивная карта как инструмент моделирования инновационной деятельности на региональном уровне // Программные продукты и системы. 2012. № 4. С. 128-132.

4. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps // International Journal of Man-Machine Studies. 1986. Vol. 24. Pp. 65-75.

5. Силов В. Б. Принятие стратегических решений в нечеткой обстановке. М.: ИНПРО-РЕС, 1995. 228 с.

6. Borisov V. V., Fedulov A. S. Generalized rule-based fuzzy cognitive maps: structure and dynamics model // Lecture Notes in Computer Science. 2004. Vol. 3316. Pp. 918-922.

7. Carvalho J. P. Rule based fuzzy cognitive maps in humanities, social sciences and economics // Soft Computing in Humanities and Social Sciences. Vol. 273 of the series Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. Pp. 289-300.

8. Федулов А. С. Нечеткие реляционные когнитивные карты // Известия РАН. Теория и системы управления. 2005. № 1. С. 120-133.

9. Борисов В. В., Федулов А. С., Зернов М. М. Основы теории нечетких отношений. Серия «Основы нечеткой математики». Книга 3. Учебное пособие для вузов. М.: Горячая линия–Телеком, 2014. 86 с.

10. Робертс Ф.С. Дискретные модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам. М.: Наука, 1986. 497 с.

11. Алтунин А. Е., Семухин М. В. Модели и алгоритмы принятия решений в нечетких условиях. Тюмень: Изд-во ТГУ, 2000. 352 с.

12. Федулов А. С. Устойчивая операция аккумулирования нечетких чисел// Нейрокомпьютеры: разработка, применение. 2007. № 1. С. 37-46.

13. Федулов А. С. Использование операций композиции и объединения нечетких множеств и отношений для анализа нечетких реляционных когнитивных карт // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал [Эл. ресурс]. 2013. Т. 12. №. 3. URL: http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-39-html/fedulov/fedulov.htm (дата доступа 10.12.2015).

## References

1. Borisov V. V, Kruglov V. V., Fedulov A. S. *Fuzzy models and nets*. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2012. 284 p. (in Russian).

2. Zakharova A. S., Glyzin A. A. Fuzzy cognitive modeling of poorly formalized systems and processes. *Fundamentalnyie issledovaniya*, 2014, no. 9, pp. 511-515 (in Russian).

3. Kakatunova T. V., Paluh B. V. Fuzzy cognitive map as a tool for the simulation of innovative activity at the regional level. *Programmnyie produktyi i sistemyi*, 2012, no. 4, pp. 128-132 (in Russian).

4. Kosko B. Fuzzy Cognitive Maps. *International Journal of Man-Machine Studies*, 1986, vol. 24, pp. 65-75.

5. Silov V. B. *Strategic decision making in fuzzy environment*. Moscow, INPRO-RES, 1995. 228 p. (in Russian).

6. Borisov V. V., Fedulov A. S. Generalized rule-based fuzzy cognitive maps: structure and dynamics model. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, vol. 3316, pp. 918-922.

7. Carvalho J. P. Rule based fuzzy cognitive maps in humanities, social sciences and economics. *Soft Computing in Humanities and Social Sciences. Vol. 273 of the series Studies in Fuzziness and Soft Computing. Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2012, pp. 289-300.

8. Fedulov A. S. Fuzzy relational cognitive maps. *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemyi upravleniya*, 2005, no. 1, pp. 120-133 (in Russian).

9. Borisov V. V., Fedulov A. S., Zernov M. M. *Fundamentals of the theory of fuzzy relations. Series "The foundations of fuzzy mathematics"*. Book 3. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2014, 86 p. (in Russian).

10. Roberts F. S. Discrete mathematical models with applications to social, biological and environmental problems. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*, 1976. 560 p.

11. Altunin A. E., Semukhin M. V. *Models and algorithms of decision making in fuzzy environment*. Tyumen: TGU Publ., 2000, 352 p. (in Russian).

12. Fedulov A. S. Sustained operation accumulation of fuzzy numbers. *Neyrokompyuteryi: razrabotka, primenenie*, 2007, no. 1, pp. 37-46 (in Russian).

13. Fedulov A. S. Using the operations of composition and combine fuzzy sets and relations for the analysis of fuzzy relational cognitive maps. *Matematicheskaya*

*morfologiya. Elektronnyiy matematicheskiy i mediko-biologicheskiy zhurnal*, 2013, vol. 12, no. 3, Available at: http://www.smolensk.ru/user/sgma/MMORPH/N-39-html/fedulov/fedulov (accessed 10 December 2015) (in Russian).

**Статья поступила 12 декабря 2015 г.**

## Информация об авторах

*Федулов Александр Сергеевич* – доктор технических наук, профессор. Заведующий кафедрой вычислительной техники. «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», филиал г. Смоленск. Области научных интересов: нечеткий когнитивный анализ и моделирование сложных систем и процессов; цифровая обработка сигналов; интеллектуальная поддержка принятия решений. Тел.: +7 4812 65 14 61. E-mail: fedulov_a@mail.ru

*Борисов Вадим Владимирович* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры вычислительной техники – Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», филиал г. Смоленск. Старший научный сотрудник научно-исследовательского центра – Военная академия Войсковой противовоздушной обороны Вооруженных сил Российской Федерацииим им. А.М. Василевского. Области научных интересов: нечеткий и нейро-нечеткий анализ, моделирование сложных систем и процессов; интеллектуальная поддержка принятия решений; ассоциативные системы хранения и обработки информации. Тел.: +7 4812 65 14 61. E-mail: vadim.v.borisov@mail.ru.

Адрес: 214013, Россия, г. Смоленск, Энергетический проезд, д. 1.

---

# Models of System Dynamics Based on Fuzzy Relational Cognitive Maps

A. S. Fedulov, V. V. Borisov

***Purpose.*** *Fuzzy cognitive maps are intended for the formalization, analysis and modeling problems, semi-structured systems and processes. Fuzzy relational cognitive maps provide expanded opportunities for solving these problems under uncertainty. Of particular interest is the use of these maps for analysis and modeling of system dynamics. This leads to the need to address the challenges of increasing uncertainty and intersection of fuzzy values of their basic sets. The purpose of this work is the development and study of models of system dynamics based on fuzzy relational cognitive maps, which ensure the preservation of fully fuzzy representation of the results at all stages of modeling, while avoiding the constantly increasing uncertainty and intersection of fuzzy values of their basic sets.* ***Methods.*** *Methods of theories of fuzzy sets, fuzzy relations, fuzzy computing and fuzzy cognitive modeling.* ***Novelty.*** *The proposed models of system dynamics based on fuzzy relational cognitive maps are characterized by elements of novelty through the use of resistant to the growing uncertainty of operations on fuzzy numbers and relations. All of this provides: first, a fully fuzzy representation of the values of concepts at all stages of modeling; second, the membership values and increments of the concepts in the family of fuzzy numbers; third, intersection of fuzzy values of their basic sets; fourth, the natural aggregation of the fuzzy values of the concepts.* ***Results****. The validity of the analysis and the quality modeling of problems of semi-structured systems and processes under uncertainty will increase when using the proposed models.* ***Practical relevance****. The presented models of system dynamics based on fuzzy relational cognitive maps will be used to design software for analysis and modeling problems, semi-structured systems and processes.*

*Key words: fuzzy relational cognitive map, fuzzy numbers and relations, model of system dynamics, semi-structured systems and processes.*

Research is supported by the grant of the Russian Foundation for Basic Research, project No. 15-41-03259-r_centre_a.

## Information about Authors

*Fedulov Alexander Sergeevich* – Dr. Tech. Sc., Professor. Head of the Dept of Computer Engineering. The branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk. Fields of research: fuzzy cognitive analysis and modeling of complex systems and processes; digital signal processing; intellectual decision-making. Tel.: +7 4812 65 14 61. E-mail: fedulov_a@mail.ru.

*Borisov Vadim Vladimirovich* – Dr. Tech. Sc., Professor. Professor of the Dept of Computer Engineering, The branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk. Senior researcher, Military Academy of Army Air Defence A.M. Vasilevsky. Fields of research: fuzzy and fuzzy neural models and networks, intellectual decision-making support, associative memory, associative systems of storage and processing of the information and knowledge. Tel.: +7 4812 65 14 61.
E-mail: vadim.v.borisov@mail.ru.

Address: Russia, 214013, Smolensk, Energeticheskiy proezd, 1.

УДК 004.7

# Сети следующего поколения NGN

Макаренко С. И., Чаленко Н. Н., Крылов А. Г.

***Постановка задачи:*** *конвергенция сетей, развитие спектра услуг, систем и технологий в области телекоммуникаций и информатики актуализируют вопросы разработки новых концептуальных технологий объединения сетей на основе единой платформы предоставления услуг связи.* ***Целью работы*** *является анализ применимости технологии сетей следующего поколения NGN к конвергенции современных телекоммуникационных систем в интересах предоставления операторами новых услуг связи. А также, формирование предложений по объединению развернутых различными операторами и провайдерами транспортных сетей на базе единой платформы сетей NGN.* ***Результат.*** *Показано, что на основе концепции NGN может быть создано единое инфокоммуникационное пространство оператора связи, объединяющие в себя сети на основе различных технологий транспортных сетей. Основу такого пространства составят IP/MPLS сети, а формирование нового базиса услуг связи обеспечат разветвленные механизмы управления ресурсами, принятые в NGN.* ***Практическая значимость.*** *Возможности применения концепции NGN для создания инфокоммуникационного пространства оператора связи рассмотрено на примере сети H.323 применительно к оператору, специализирующемуся на оказании услуг голосовой и видеосвязи.*

***Ключевые слова:*** *конвергенция, сети следующего поколения, NGN, H.323.*

## Актуальность разработки сетей следующего поколения NGN

Современным абонентам инфокоммуникационных услуг требуется широкий класс разных служб и приложений, предполагающий большое разнообразие протоколов, технологий и скоростей передачи. В существующей ситуации на рынке инфокоммуникационных услуг сети перегружены: они переполнены многочисленными интерфейсами клиентов, сетевыми слоями и контролируются слишком большим числом систем управления. Большие эксплуатационные затраты подталкивают операторов к поиску решений, упрощающих функционирование, при сохранении возможности создания новых служб и обеспечении стабильности существующих источников доходов, от предоставления услуг связи.

Указанные сложности, а также необходимость повышения гибкости управления сетевыми услугами, для операторов связи предполагает решение следующихе задач:

- создание единой информационной среды оператора связи;
- формирование распределенных прозрачных и гибких мультисервисных сетей;
- оптимизация управления IT-инфраструктурой;
- использование современных сервисов управления вызовами;
- предоставление мультисервисных услуг;
- управление услугами в реальном времени;
- поддержка мобильных пользователей;

– мониторинг качества предоставляемых услуг и работы сетевого оборудования.

Решение данных задач, реализуется через предоставление операторами услуг связи нового типа, получивших название инфокоммуникационных услуг.

*Инфокоммуникационная услуга* – услуга связи, предполагающая автоматизированную обработку, хранение или предоставление по запросу информации с использованием средств вычислительной техники, как на входящем, так и на исходящем конце соединения [1].

К инфокоммуникационным услугам предъявляют следующие требования [1]:

– мобильность;
– возможность гибкого и быстрого создания новых услуг;
– гарантированное качество.

Модель предоставления инфокоммуникационных услуг, определяющая состав участников и их взаимоотношения, включает в себя [1]:

– пользователей, которые делятся на категории в зависимости от требований к инфокоммуникационным услугам;
– оператора сети связи (Network operator) – физическое или юридическое лицо, обладающее собственной инфраструктурой связи и, имеющее право на предоставление телекоммуникационных услуг на основе выданной лицензии;
– поставщик услуги (Service Provider) – индивидуальный предприниматель или юридическое лицо, оказывающее инфокоммуникационные услуги, но не обладающее собственной инфраструктурой связи (в свою очередь является потребителем услуг переноса, предоставляемых оператором сети связи).

*Услуга переноса* – услуга связи, обеспечивающая прозрачную передачу информации пользователя между сетевыми окончаниями без какого-либо анализа и обработки ее содержания [1].

Потребности операторов сетей связи оказывать новые инфокоммуникационные услуги делает актуальным разработку сети, которая позволяла бы реализовывать следующие потенциальные возможности:

– быстрое, дешевое создание и внедрение новых услуг в интересах увеличения абонентской базы;
– снижение затрат на обслуживание сети и поддержку пользователей;
– независимость операторов услуг, от операторов связи и независимость последних от поставщиков телекоммуникационного оборудования;
– обработка лавинообразно нарастающего объема трафика пользователей, за счет внедрения решений, позволяющих эффективно масштабировать пропускную способность сети;
– обеспечения обобщенной глобальной мобильности пользователей и предоставляемых им услуг связи.

Эволюционное развитие сетей операторов связи от аналого-цифрового варианта к сети связи обеспечивающей указанные возможности привело к созданию NGN-архитектуры (рис. 1).

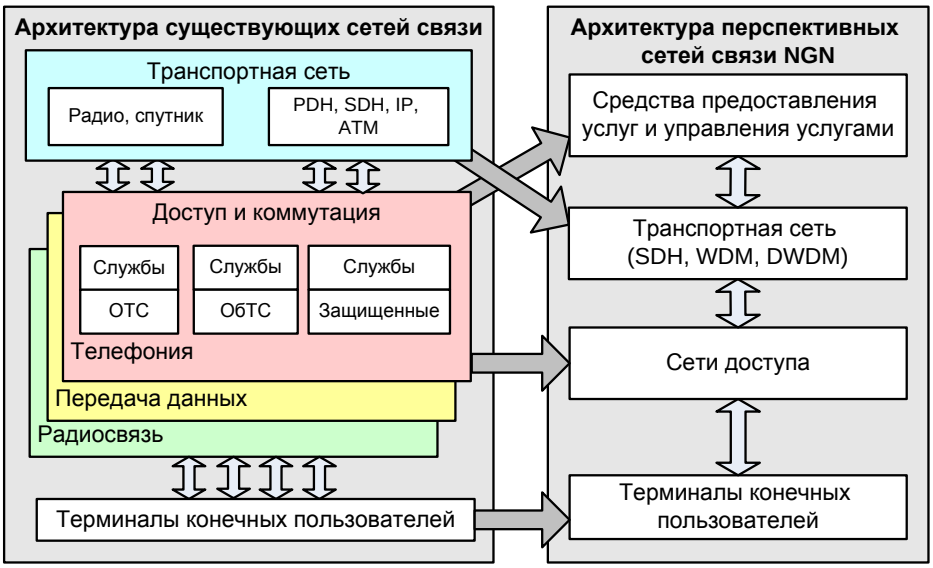



Рис. 1. Эволюция архитектуры сетей операторов связи

Создание сети NGN отражает эволюционное развитие существующих телекоммуникационных сетей, за счет слияния сетей и технологий. Благодаря этому обеспечивается широкий набор услуг, начиная с классических услуг телефонии и кончая различными услугами передачи данных или их комбинацией. Сети следующего поколения (NGN) представляют собой новую концепцию мультисервисной сети, комбинирующую в себе голосовые функции, качество обслуживания (QoS) и коммутируемые сети с преимуществами и эффективностью пакетной сети. При этом интеграция существующих служб ведется путем использования распределенной программной коммутации (soft-switches).

Рекомендация МСЭ-Т Y.2001 [2] определяет терминологический базис NGN следующим образом.

*Концепция NGN* – концепция построения сетей связи следующего/нового поколения (Next/New Generation Network), обеспечивающих предоставление неограниченного набора услуг с гибкими настройками по их:

– управлению;
– персонализации;
– созданию новых услуг за счет унификации сетевых решений.

*Мультисервисная сеть* – сеть связи, которая построена в соответствии с концепцией NGN и обеспечивает предоставление неограниченного набора инфокоммуникационных услуг (VoIP, Интернет, VPN, IPTV, VoD и др.) [2].

Услуги мультисервисных сетей классифицируются с использованием системы классификаторов приведенной в [1] и представленной на рис. 2.

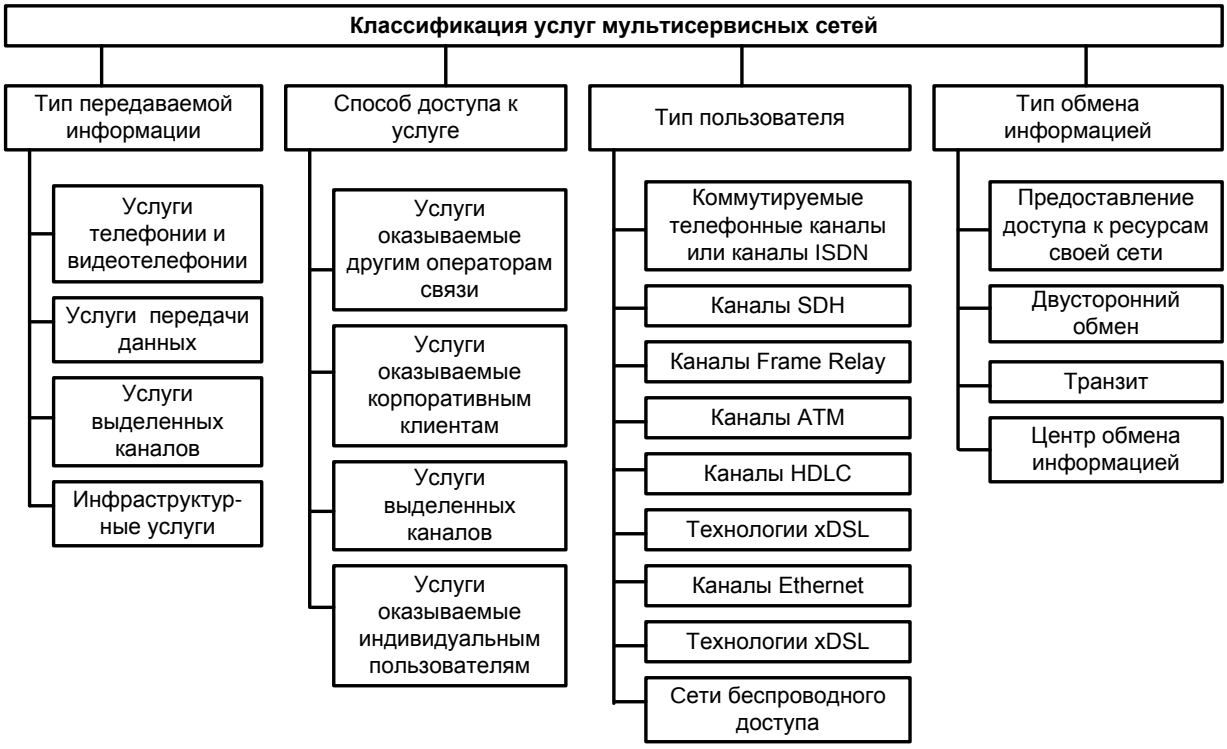



Рис. 2. Классификационные признаки услуг мультисервисных сетей [1]

Услуги, предъявляющие различные требованиями к ширине полосе, с гарантированной полосой или без нее, должны поддерживаться с учетом технических возможностей используемой технологии передачи данных. Особое внимание в сетях NGN уделяется гибкости реализации услуг в стремлении к наиболее полному удовлетворению всех требований абонентов. В некоторых случаях возможно также предоставление пользователю возможности настройки используемых им услуг. NGN должна поддерживать открытые интерфейсы программирования приложений, чтобы поддерживать создание, предоставление и управление услугами.

*Сеть NGN* – сеть с пакетной коммутацией, пригодная для предоставления услуг электросвязи и для использования нескольких широкополосных технологий транспортировки с включенной функцией QoS, в которой связанные с обслуживанием функции не зависят от примененных технологий, обеспечивающих транспортировку [2].

*Основная особенность сетей NGN* – дифференциация между услугами и транспортными технологиями. Это позволяет рассматривать сеть в виде логически разделенной на уровни сущности. Каждый уровень сети может развиваться независимо, не оказывая влияния на другие уровни. Межуровневое взаимодействие осуществляется на основе открытых интерфейсов. Принцип логического разделения позволяет предоставлять как существующие, так и инновационные услуги независимо от используемых транспортных технологий доступа.

*Функциональные объекты NGN сети* - группы функций, реализующих конечную логику функционирования устройств, например, логику устройства хранения и управления базой данных абонентских профилей.

В NGN функциональные объекты, регулирующие вопросы политики, сеансы связи, среду передачи, ресурсы, доставку услуг, защиту и другие процедуры, могут быть распределены по инфраструктуре, включая существующие и новые сети. При их территориальном распределении в пространстве они должны поддерживать связь через открытые интерфейсы. Важным моментом для NGN является идентификация опорных точек – логических интерфейсов взаимодействия между различными элементами сети. Для обеспечения связи между взаимодействующими функциональными объектами необходимо стандартизировать протоколы.

Взаимодействие между NGN разных операторов и между NGN и существующими сетями (например, сетями сотовых операторов, цифровые сети с интеграцией служб (ЦСИС), глобальными системами подвижной связи GSM) обеспечивается с помощью шлюзов.

*Сеть NGN* – универсальная сеть, поддерживающая как абонентов, использующих NGN терминалы, так и абонентов традиционных сетей связи.

В основу концепции NGN заложена идея о создании универсальной сети, которая бы позволяла переносить любые виды информации, такие как: речь, видео, аудио, графику и т.д., а также обеспечивать возможность предоставления неограниченного спектра инфокоммуникационных услуг.

Базовым принципом концепции NGN является отделение друг от друга функций переноса и коммутации, функций управления вызовом и функций управления услугами [3-5].

*Идеологические принципы построения сети NGN* [3-5]:

– подключение к сети должно быть максимально простым и удобным, без использования промежуточных систем, при этом использование традиционно применяемых протоколов и сервисов должно быть доступно в прежнем объеме;
– сначала строится базовая пакетная транспортная сеть на базе компьютерных технологий, обеспечивающих соответствующее качество, надежность, гибкость и масштабируемость, а потом поверх этой сети строится мощный комплекс сервисов, на основе которых предоставляются услуги.

В итоге все информационные потоки интегрируются в единую сеть.

*Требования к сетям связи NGN* [3-5]:

– мультисервисность - независимость технологий предоставления услуг от транспортных технологий;
– широкополосность - возможность гибкого и динамического изменения скорости передачи информации в широком диапазоне в зависимости от текущих потребностей пользователя;
– мультимедийность - способность сети передавать многокомпонентную информацию (речь, данные, видео, аудио и др.) с необходимой синхронизацией этих компонент в реальном времени и использованием сложных конфигураций соединений;

– интеллектуальность - возможность управления услугой, вызовом и соединением со стороны пользователя или поставщика услуг;
– инвариантность доступа - возможность организации доступа к услугам независимо от используемой технологии;
– многооператорность - возможность участия нескольких операторов в процессе предоставления услуги и разделение их ответственности в соответствии с их областью деятельности.

*Возможности сетей NGN* [3-5].

1. Реализация универсальной транспортной сети с распределенной коммутацией.
2. Обеспечение создания, развертывания и управления любого вида служб. В том числе службы, использующие различные среды передачи, известные схемы кодирования и сервисы, в реальном времени и вне реального времени, чувствительные к задержке и допускающие задержку, требующие различной ширины полосы пропускания, гарантированные и нет.
3. Четкое разделение между функциями служб связи и транспортными функциями, что является одной из основных особенностей NGN.
4. Предоставление как существующих, так и новых служб, независимо от типа используемых сети и доступа.
5. Вынесение функций предоставления услуг в оконечные сетевые узлы,
6. Функциональные элементы политики управления, сеансов, медиа, ресурсов, доставки служб, безопасности и т.д. должны быть распределены по сетевой инфраструктуре, включая как существующие, так и новые сети.
7. Осуществление межсетевого взаимодействия между NGN и существующими сетями, такими как ТфОП, ЦСИС, СПС посредством шлюзов.
8. Поддержка существующих и предназначенных для работы на NGN оконечных устройств.
9. Решение проблем миграции речевых служб в инфраструктуру NGN, с обеспечением качества обслуживания (QoS) и безопасности.
10. Обобщенная подвижность, которая позволит обеспечить совместимое предоставление услуг пользователю, при использовании им различных технологий доступа, вне зависимости от того, какими устройствами он располагает.

*Преимущества NGN* [3-5]:

– предоставление современных высокоскоростных сервисов;
– масштабируемость;
– совместимость с международными стандартами, доступ по общепринятым интерфейсам (таким, как Ethernet), поддержка традиционных сетевых технологий (ATM, FR и др.);
– мультипротокольная поддержка;
– управление трафиком (traffic engineering);

– резервирование полосы пропускания;
– классификация видов трафика;
– управление качеством обслуживания;
– механизмы защиты соединений и трафика.

*Фундаментальные свойства NGN* [3-5]:

– поддержка большого набора услуг, приложений и механизмов поблочного построения услуг (включая услуги в реальном времени/ потоковую передачу/ услуги, предоставляемые не в режиме реального времени и мультимедиа-услуги);
– отделение процесса предоставления услуги от самой сети и обеспечение открытых интерфейсов, разделение функций управления от возможностей транспортной среды, вызова/сеанса и приложения/услуги, что позволяет услугам и сетям развиваться независимо друг от друга;
– взаимодействие с унаследованными сетями по открытым интерфейсам;
– пакетная передача данных;
– широкополосный доступ с обеспечением качества «из конца в конец»;
– обобщенная мобильность;
– открытый доступ пользователей к различным сервис-провайдерам;
– различные схемы идентификации, которые могут быть реализованы с использованием IP-адресации в целях маршрутизации по IP-сетям;
– унифицированные характеристики услуги в понимании пользователя;
– конвергенция услуг между сетями фиксированной и подвижной связи;
– совместимость со всеми требованиями в области регулирования отрасли, например, экстренной связи, безопасности, защищенности и т.п.

## Концепция NGN

Концепция NGN предполагает построение сети, исходя из принципа функционального разделения (рис. 3), достигаемого за счет разнесенных на сети функциональных сетевых элементов.

Рекомендация МЭС-Т Y.2001 определяет следующие логические уровни сети NGN [2]:

– уровня транспорта, включая функции управления сетевыми ресурсами и уровень доступа;
– уровня коммутации услуг связи;
– уровня приложений;
– уровня управления сетью.

Рис. 3. Эталонная модель NGN [2]

Функциональная архитектура сети NGN должна предполагать на основании рекомендации МСЭ-Т Y.2001 наличие следующих основных уровней [2]:

– уровня транспорта, включающего функции управления сетевыми ресурсами и уровень доступа;
– уровня коммутации услуг связи;
– уровня приложений;
– уровня управления сетью.

Для построения полноценной сети NGN необходимо в дальнейшем реализовать каждый из этих уровней, с соответствующим им набором элементов сети NGN (рис. 4). При этом на различных логических уровнях сети могут использоваться различные технологии и протоколы.

*Уровень коммутации услуг* состоит из следующих основных элементов [3, 5]:

– IMS платформа (IP Multimedia Subsystem). Эта подсистема является основным элементом сети NGN и предназначена для управления вызовами и сессиями абонентов сети NGN, должна строиться на базе протокола установления сеанса (Session Initialization Protocol, SIP). На ее базе могут строиться различные решения и реализовываться весь спектр услуг, от передачи голоса по IP сетям (Voice over IP, VoIP), до услуг Triple Play, включая IP телевидения (IP-Television, IP-TV) и ряд услуг с добавленной стоимостью;
– подсистема эмуляции сетей (PSTN/ISDN Emulation Subsystem, PES). Главной задачей данной подсистемы является поддержание на сети NGN услуг, а именно, обеспечения взаимодействия с сетями общего пользования с сохранением их функциональности;
– элемент управления потоковыми сообщениями (Streaming Service Component, SSC). Главной задачей этого элемента является предоставление пользователям сети услуг, как в реальном режиме

времени (Real Time Services), так и по необходимости или по требованию (Non Real Time Services).

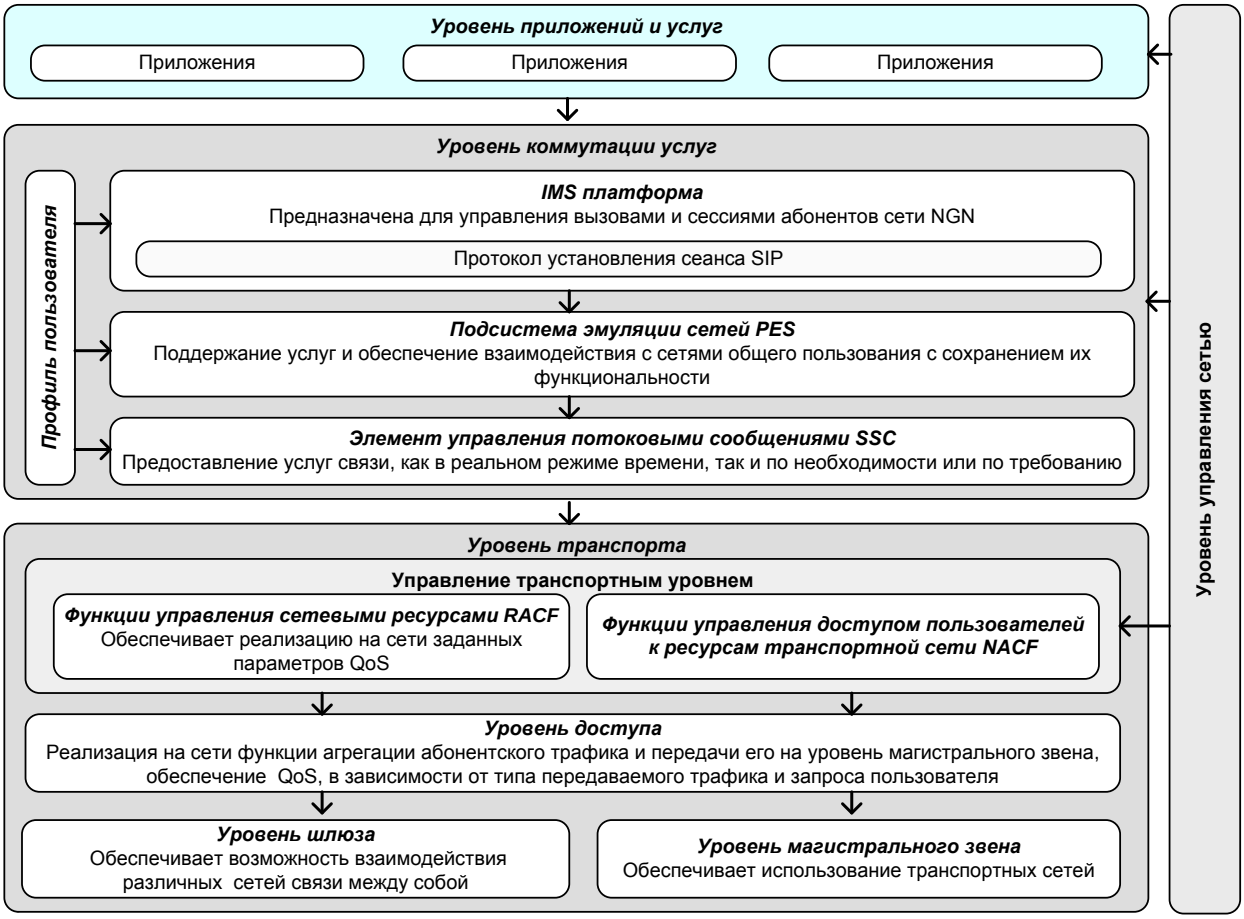



Рис. 4. Схема основных элементов сети NGN [2]

С функциональной точки зрения, данный уровень должен решать основные задачи по установлению соединений и предоставлению услуг на сети NGN. Основными функциями данного уровня являются [3, 5]:

– регистрация пользователей (аутентификация и авторизация) для предоставления им доступа к определенным услугам NGN;
– управление сессиями, вызовами (установление, разрыв и поддержание соединений);
– управление коммутацией и передачей, обработку информации сигнализации, маршрутизация вызовов и управление потоками;
– управление ресурсами сети, включая шлюзы, установленные на транспортном уровне сети NGN.

*Транспортный уровень сети NGN* обеспечивает функции коммутации и прозрачной передачи информации пользователя. Данные функции образуются двумя подгруппами [3, 5]:

– функции управления сетевыми ресурсами (Resource and Admission Control Functions, RACF), обеспечивающие реализацию в сети заданных параметров QoS. В их задачи входит резервирование определенных параметров требуемых сетевых ресурсов, управление

доступом к ресурсам транспортной сети и управление ресурсами шлюзов;
– функции управления доступом пользователей к ресурсам транспортной сети NGN (Network Attachment and Control Functions, NACF), осуществляемые на основе информации авторизации пользователей, соглашений об уровне обслуживания SLA, приоритета предоставляемой услуги, а также доступных сетевых ресурсов на транспортной сети и сети доступа.

Транспортный уровень включает в себя ряд функциональных подуровней [3, 5]:

– уровень шлюза. Данный уровень обеспечивает возможность взаимодействия с различными сетями связи построенных на основе различных технологий, а также другими подобными сетями NGN;
– уровень доступа. Доступ должен предполагать реализацию на сети функции агрегации абонентского трафика и передачи его на уровень магистрального звена. Данный уровень предполагает наличие функции QoS, зависящим от типа передаваемого трафика и запроса пользователя;
– уровень магистрального звена. Магистральное звено должно обеспечивать передачу агрегированного пользовательского трафика в соответствии с заданными показателями QoS. На данном уровне должны применяться те же механизмы по управлению QoS, что и на уровне доступа.

Оптимальной технологией для построения транспортной сети на данный момент считается IP технология многопротокольной коммутации по меткам (IP Multiprotocol Label Switching, IP/MPLS). В связи с этим все функции транспортного уровня должны решаться на уровне сети IP/MPLS. Сейчас, наиболее рациональным подходом к построению транспортной сети является применение технологий обобщенной многопротокольной коммутации по меткам GMPLS (Generalized Multi-Protocol Label Switching). Данные технологии способны обеспечивать управление и мониторинг качества всех уровней магистрального звена: сетевого, канального и физического. Это обеспечивает возможность предоставление абонентам сети услуг с заданным качеством.

*Уровень приложений и услуг* содержит функции управления логикой услуг и приложений и представляет собой распределенную вычислительную среду, обеспечивающую следующие потребности [3, 5]:

– предоставление инфокоммуникационных услуг;
– управление услугами;
– создание и внедрение новых услуг;
– взаимодействие различных услуг.

*Уровень управления услугами* позволяет реализовать специфику услуг, и применять одну и ту же программу логики услуги вне зависимости от типа транспортной сети (IP, ATM, FR и т.п.) и способа доступа. Наличие этого уровня позволяет также вводить на сети любые новые услуги без

вмешательства в функционирование других уровней [3, 5]. В основе уровня лежит взаимодействие с центральными элементами сети NGN – элементами уровня коммутации (IMS, PES и SSC), которое осуществляется по стандартным интерфейсам доступа в сеть (Access Network Interface, ANI). Данный уровень может включать множество независимых подсистем ("сетей услуг"), базирующихся на различных технологиях, имеющих своих абонентов и использующих свои, внутренние системы адресации.

*Уровень управления сетью* отвечает за организацию системы управления сетью NGN. В задачи уровня входят мониторинг и соответствующее управление инфраструктурой сети, поддержание на сети заданных параметров качества, а также ряда параметров, характеризующих принцип работы сети в целом (безопасность и надежность) [3, 5].

Система управления должна обеспечивать [3, 5]:

– управление процедурами устранения ошибок и сбоев;
– управление процедурами конфигурации;
– управление автоматизированной системой расчетов;
– управление сетевыми характеристиками;
– управление безопасностью.

Совокупная функциональная архитектура сети NGN представляет собой взаимоувязанные технологические решения по всем функциональным уровням, с учетом приведенных выше принципов построения и требований (рис. 5).

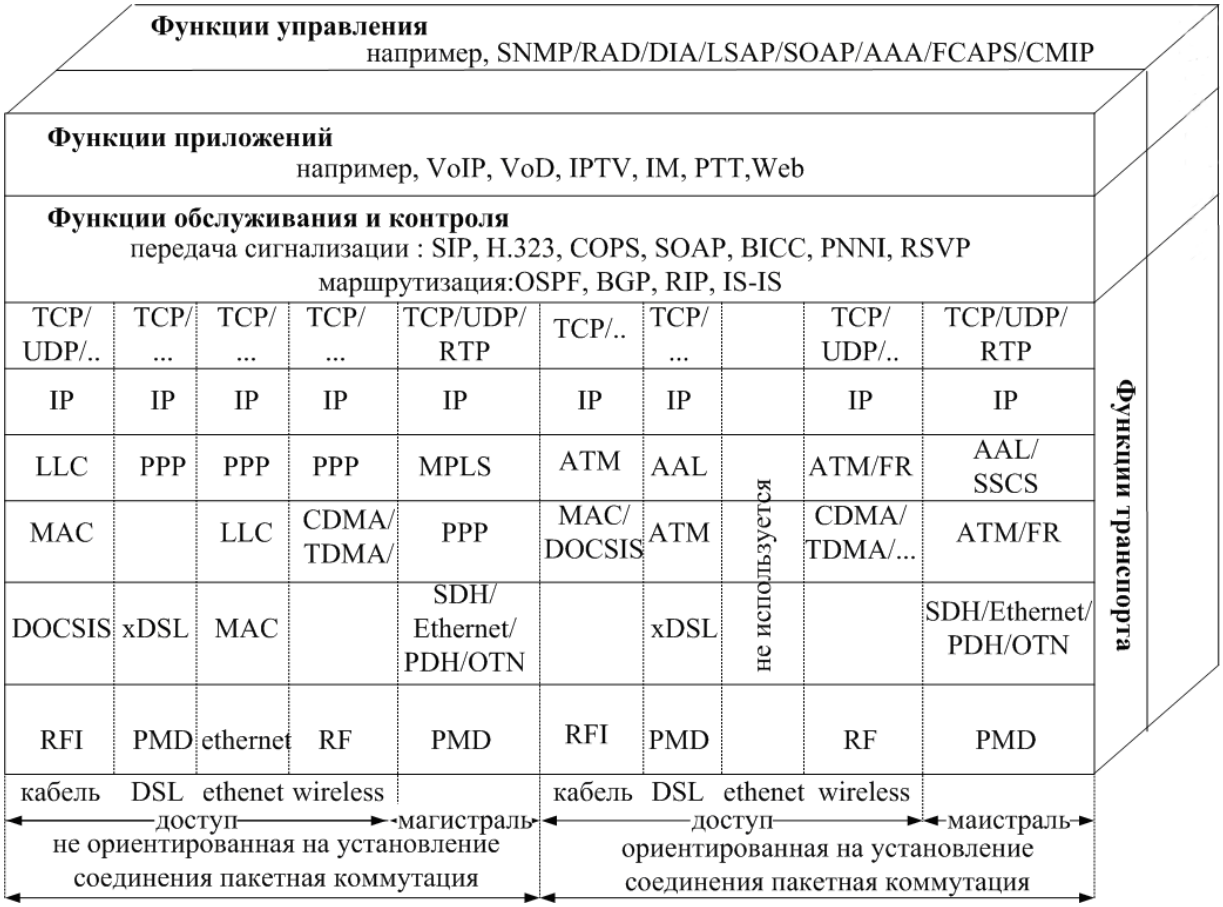



Рис. 5. Реализация модели сети NGN на основе существующих технологий связи [4]

## Архитектура NGN

Особенностью сети NGN является использование в составе сети гибких программируемых коммутаторов Softswitch, которые являются носителями интеллектуальных возможностей сети, целью которых является координация управления обслуживанием вызовов, сигнализации и функции, обеспечивающие установление соединения через одну или нескольких сетей.

В число функций управления обслуживанием вызова входят [1]:

– распознавание и обработка цифр номера для определения пункта назначения;
– распознавание моментов ответа и отбоя абонентов, регистрация этих действий для начисления платы.

Оборудование Softswitch взаимодействует со многими компонентами в телекоммуникационной системе [3-5]:

– система тарификации;
– платформа услуг и приложений;
– сеть общеканальной сигнализации (ОКС).

SoftSwitch координирует обмен сигнальными сообщениями между сетями, поддерживая и преобразуя существующие протоколы сигнализации (рис. 6).

Основные типы сигнализации, которые использует SoftSwitch [4, 5]:

– сигнализация для управления соединениями (протоколы SIP-T, ОКС-7 и H.323, в качестве опции протокол E-DSS1 первичного доступа ISDN, протокол абонентского доступа V5, а также сигнализация по выделенным сигнальным каналам CAS);
– сигнализация для взаимодействия SoftSwitch между собой (протоколы SIP-T и BICC);
– сигнализация для управления транспортными шлюзами (протоколы MGCP и Megaco/H.248).

Традиционные сети операторов в единой структуре объединяют функции коммутации, управление обслуживанием вызовов, услуги и приложения, а также функции биллинга. Такая сеть представляет собой монолитную закрытую системную структуру, как правило, не допускающую расширения или модернизации на базе оборудования других производителей.

Внедрение Softswitch позволяет изменить традиционно закрытую структуру систем коммутации. Softswitch предоставляя открытые стандартные интерфейсы между тремя основными функциями: коммутации, управления обслуживанием вызовов, услуг и приложений позволяет согласовывать разные протоколы сигнализации как сетей одного типа (например, при сопряжении сетей H.323 и SIP), так и при взаимодействии сетей коммутации каналов с IP-сетями.

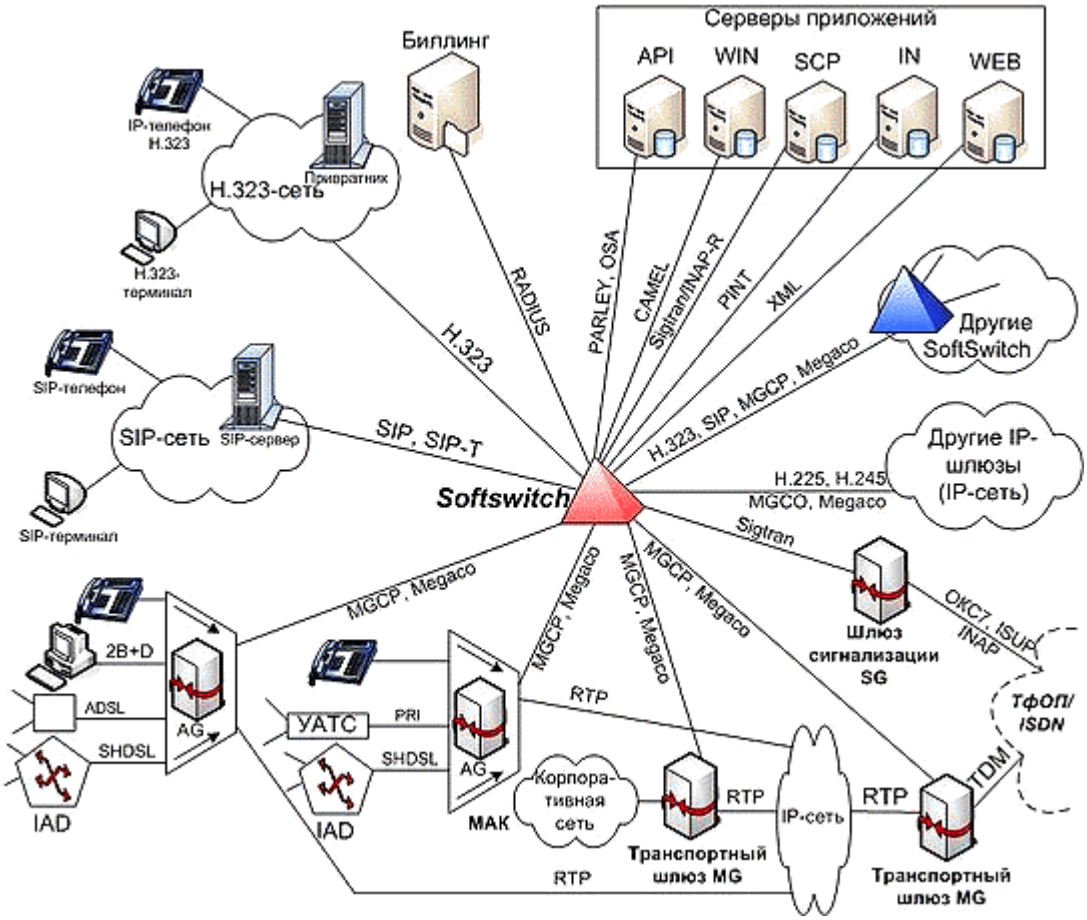



Рис. 6. Координация SoftSwitch обмена сигнальными сообщениями [4]

В архитектуре сетей NGN присутствует несколько элементов, представляющих собой отдельные устройства или произвольные комбинации в интегрированном устройстве.

Наиболее важными элементами сети NGN являются [3, 5]:

1. Медиа-шлюз (MG - Media Gateway) обрабатывает вызовы из внешней сети (например, сжимает и пакетирует голос/видео, передает сжатые голосовые пакеты в сеть IP, а также проводит обратную операцию для голосовых вызовов из сети IP). Медиа-шлюз также обеспечивает решение задач удаленнного доступа, маршрутизации, фильтрования трафика TCP/IP, поддержки виртуальных частных сетей, и т.п.
2. Шлюз сигнализации (SG - Signaling Gateway) служит для преобразования сигнализации и обеспечивает ее прозрачную передачу между коммутируемой и пакетной сетью. Он обрабатывает сигнализацию и передает сообщения через сеть IP контроллеру медиа-шлюза или другим шлюзам сигнализации.
3. Контроллер медиа-шлюза (MGC - Media Gateway Controler) выполняет регистрацию и управляет пропускной способностью медиа-шлюза. Через медиа-шлюз обменивается сообщениями с телефонными станциями.

На рис. 7 показана принципиальная архитектура сети NGN, предложенная МСЭ в рекомендации Y.1001. На рис. 8 приводится пример сети NGN,

включающей в себя все вышеописанные элементы, а так же принципы их взаимодействия.

Логика обработки вызовов реализуется в контроллере шлюзов MGC. Взаимодействие Softswitch с коммутационными станциями других сетей осуществляется через оборудование медиа-шлюза MG. Для этих целей используется протокол MGCP (Megaco) который ориентирован, прежде всего, на IP-технологии. В результате работы МСЭ по развитию данного протокола появились рекомендации H.248, которые в большей ориентированы на передачу мультимедийной информации, чем на передачу неструктурированного трафика данных.

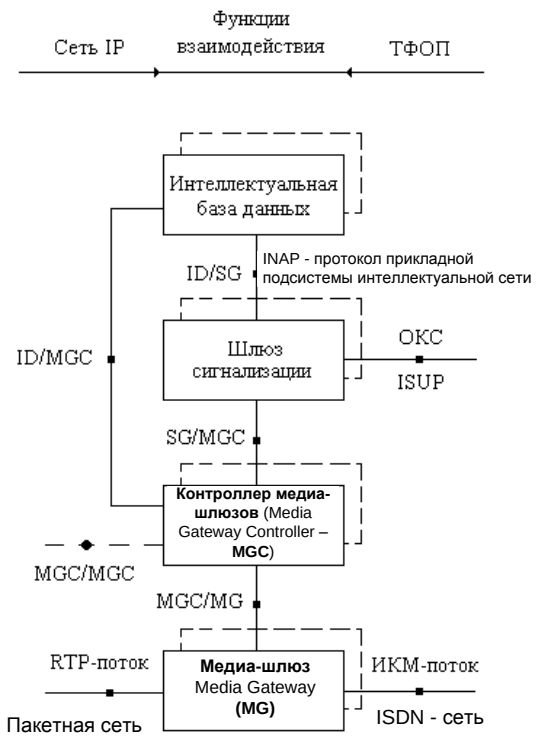



Рис. 7. Пример сети NGN

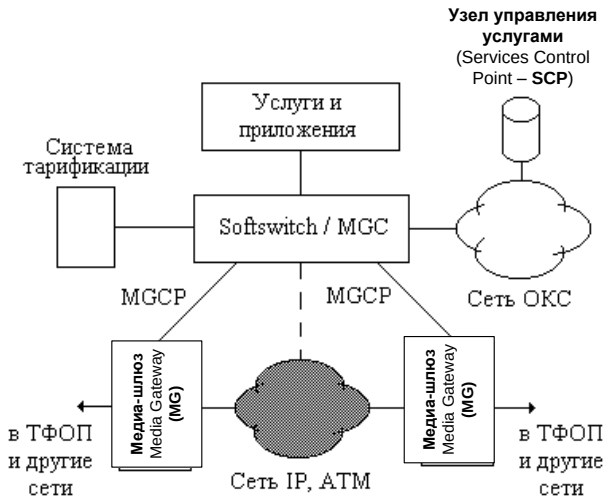



Рис. 8. Принципиальная архитектура сети NGN

Следует только отметить возможность выхода MGC через сеть ОКС на узел управления услугами (Services Control Point – SCP), входящий в состав интеллектуальной сети, что позволяет дополнить услуги и приложения, доступные абонентам непосредственно через Softswitch, интеллектуальными услугами.

Пунктирной линией на рис. 8 показана связь Softswitch с пакетной сетью, которая, как правило, базируется на технологиях IP и ATM, и которая обрабатывает основную часть трафика телекоммуникационной системы.

Архитектура сетей NGN будет состоять из IP-ядра и нескольких сетей доступа, использующих разные технологии. Основу сети NGN составляет универсальная транспортная сеть, реализующая функции транспортного уровня и уровня управления коммутацией и передачей.

Транспортная сеть NGN состоит из следующих компонентов [1]:

– транзитные узлы, выполняющие функции переноса и коммутации;
– оконечные (граничные) узлы, обеспечивающие доступ абонентов к мультисервисной сети, а также могут выполнять функции узлов служб за счет добавления функций предоставления услуг;
– контроллеры сигнализации, выполняющие функции обработки информации сигнализации, управления вызовами и соединениями;
– шлюзы, позволяющие осуществить подключение традиционных сетей связи (ТФОП, СПД, СПС) к транспортной сети.

Архитектура сети связи, построенная в соответствии с концепцией NGN показана на рис. 9.

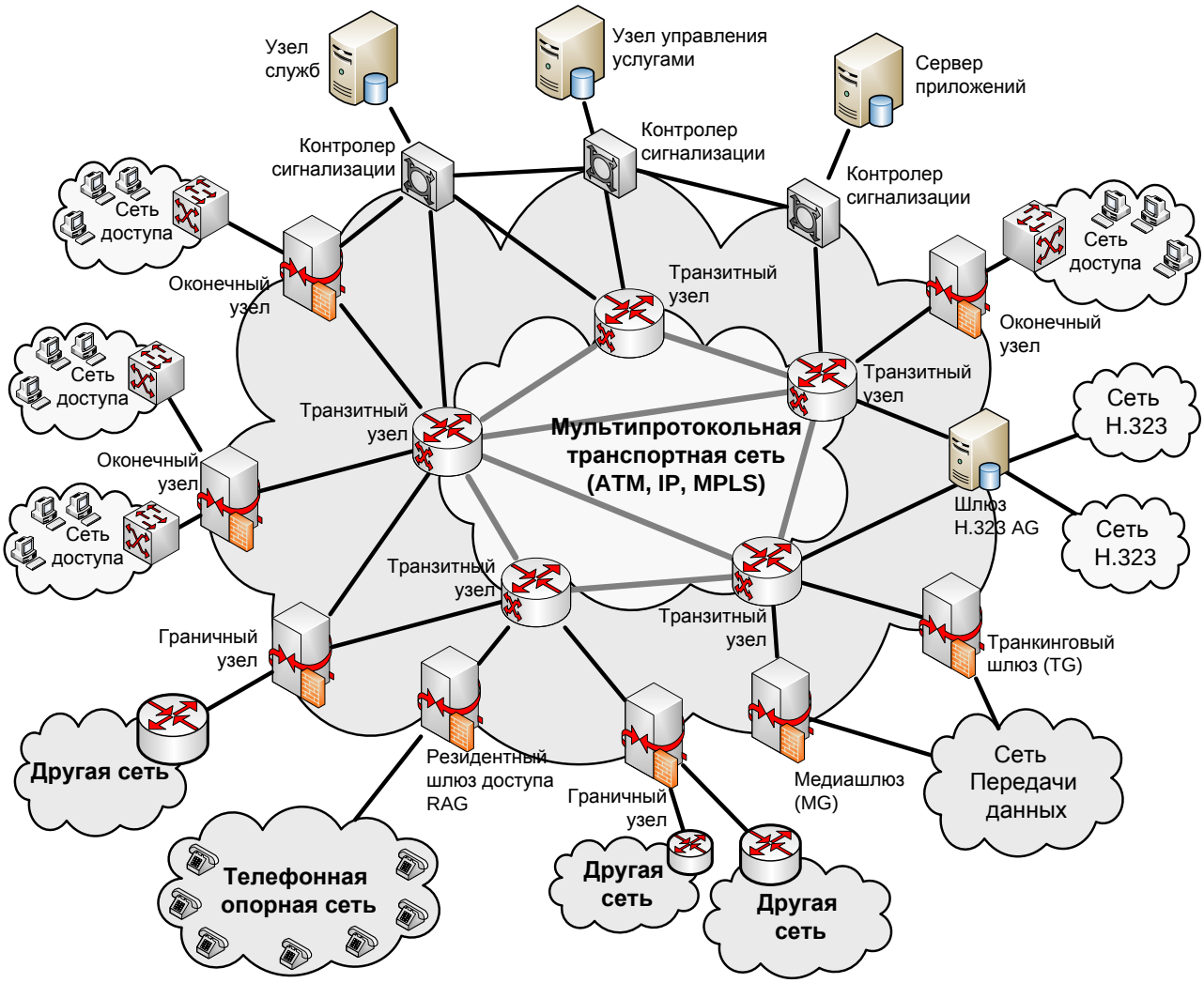



Рис. 9. Архитектура сети связи, в соответствии с концепцией NGN

В качестве технологической основы построения транспортного уровня мультисервисных сетей рассматриваются ATM и IP с возможным применением в будущем оптической коммутации (ASON).

Реализация инфокоммуникационных услуг в транспортной сети осуществляется на базе узлов служб (Services Node – SN) и/или узлов управления услугами (SCP). Узлы SN является оборудованием поставщиков

услуг и может рассматриваться в качестве сервера приложений для инфокоммуникационных услуг, клиентская часть которых реализуется оконечным оборудованием пользователя. Узлы SCP является элементом распределенной интеллектуальной платформы и выполняет функции управления логикой и атрибутами услуг. Совокупность нескольких узлов служб и/или узлов управления услугами, задействованных для предоставления одной и той же услуги, образуют платформу управления услугами. В состав платформы также могут входить узлы административного управления услугами и серверы различных приложений.

Оконечные/оконечно-транзитные узлы транспортной сети могут выполнять функции узлов служб, т.е. состав функций граничных узлов может быть расширен за счет добавления функций предоставления услуг. Для построения таких узлов может использоваться технология гибкой коммутации (Softswitch).

Если представить топологию сети NGN в виде набора плоскостей (рис. 10), то внизу окажется плоскость абонентского доступа (базирующаяся, например, на трех средах передачи: медном кабеле, оптоволокне и радиоканалах), далее идет плоскость коммутации (коммутации каналов и/или коммутации пакетов). В указанной плоскости находится и структура мультисервисных узлов доступа. Над ними располагаются программные коммутаторы SoftSwitch, составляющие плоскость программного управления, выше которой находится плоскость интеллектуальных услуг и эксплуатационного управления услугами.

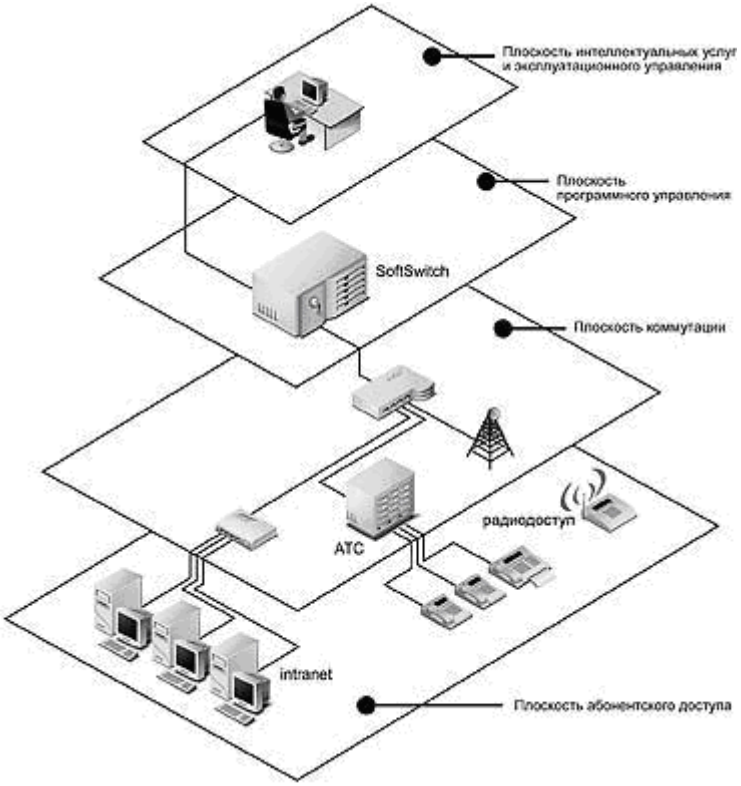



Рис. 10. Топология сети NGN в виде набора плоскостей

Инфокоммуникационные услуги предполагают взаимодействие поставщиков услуг и операторов связи. Основными услугами сети доступа должно являться обеспечение подключения следующих типов абонентов:

- абоненты аналогового доступа ТФОП;
- абоненты доступа ЦСИС;
- абоненты доступа xDSL;
- абоненты выделенных каналов связи $N$×64 кбит/с и 2 Мбит/с;
- абоненты, использующие для доступа оптические кабельные технологии (PON);
- абоненты, использующие для доступа структурированные кабельные системы (HFC);
- абоненты, использующие системы беспроводного доступа и радиодоступа (Wi-Fi).

В каждой из перечисленных выше типов услуг возможна дальнейшая дифференциация в зависимости от используемой скорости передачи и/или технологии доступа.

Концепция NGN во многом опирается на технические решения, уже разработанные международными организациями стандартизации. Для управления услугами будут использованы протоколы H.323, SIP и подходы, применяемые в интеллектуальных сетях связи.

## Сети H.323 как пример сети NGN

Набор стандартов H.323 предназначен для передачи мультимедиа-данных по сетям с пакетной передачей и получил широкое распространение для предоставления услуг IP-телефонии. Рекомендации ITU-T, входящие в стандарт H.323, определяют порядок функционирования абонентских терминалов в сетях с разделяемым ресурсом, не гарантирующих качества обслуживания. Набор рекомендаций определяет сетевые компоненты, протоколы и процедуры, позволяющие организовать мультимедиасвязь в пакетных сетях. Стандарт H.323 не связан с протоколом IP, однако, большинство его реализаций основано на этом протоколе (рис. 11).

Стандарт H.323 определяет четыре основных компонента, которые вместе с сетевой структурой позволяют проводить двусторонние (точка-точка) и многосторонние (точка – много точек) мультимедиа-конференции:

- сигнализация – формирует соединение и управляет его статусом, описывает тип передаваемых данных;
- управление потоковым мультимедиа (видео и голос) – передача данных посредством транспортных протоколов реального времени (RTP);
- приложения передачи данных (факсимильные сессии и т.п.) - передача в рамках соответствующих стандартов, таких как T.120 и T.38;
- коммуникационные интерфейсы – взаимодействие устройств на физическом, канальном, сетевом уровнях.

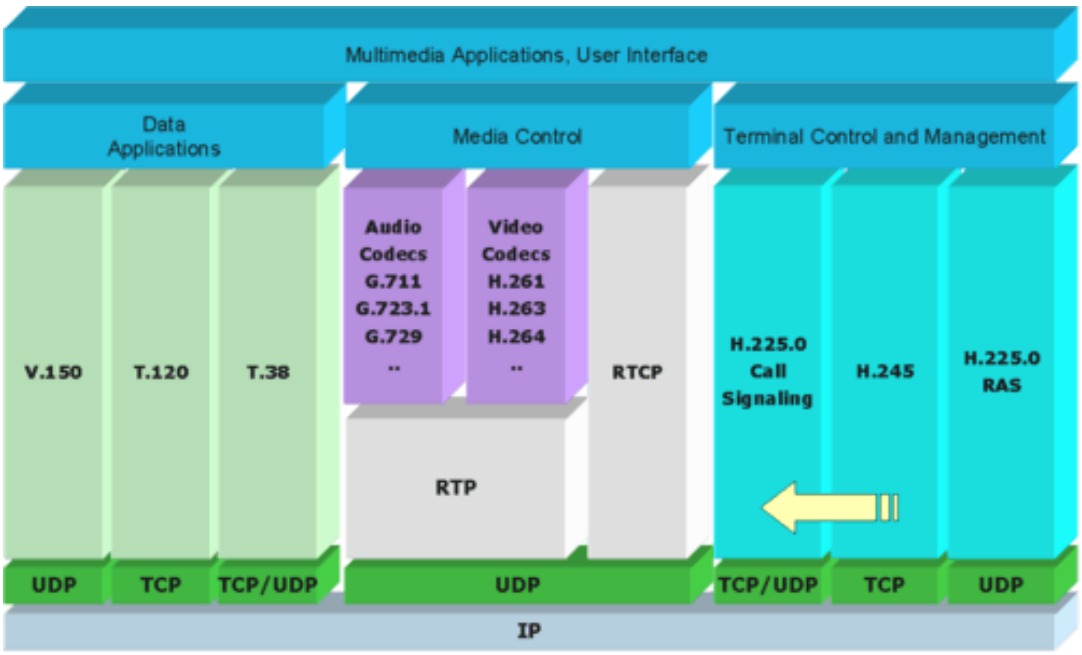



Рис. 11. Стек протоколов H.323

Сети в соответствии со стандартом H.323 (рис. 12) состоят из следующих компонентов.

1. Терминалы, представляющие собой конечные точки сети. Терминалами H.323 являются ПК с соответствующим программным обеспечением или телефоны IP, поддерживающие стандарт H.323.
2. Шлюзы H.323 – это устройства, обеспечивающие функциональность преобразования между конечными точками H.323 на стороне пакетной и коммутируемой сетей. Включают преобразование форматов передачи, процедур коммуникации, аудио/видео кодеков и осуществляют установление и разъединение соединения.
3. Привратник H.323 – это устройство, обеспечивающее преобразование адресов (IP, телефонных номеров), используемых в пакетных и коммутируемых сетях, а также управление полосой пропускания и проведение сеансов связи в сети. Привратник может быть интегрирован в одном устройстве, в таком как, например, терминал, шлюз или многопротокольный контроллер.
4. Блок многоточечного управления (MCU) – это устройства, обеспечивающие поддержку многоточечной коммуникации (конференции) трех или более конечных точек H.323. Блоки MCU отвечают за управление коммуникацией и адаптацию потоков.

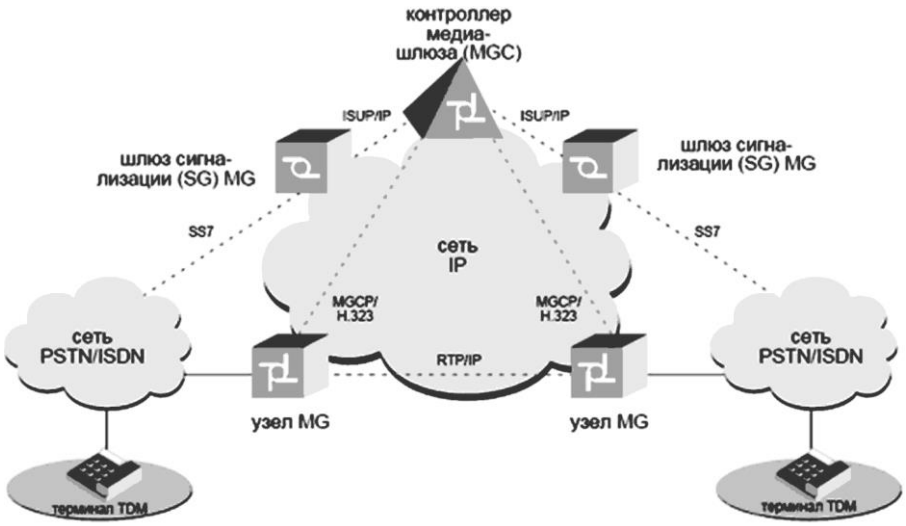



Рис. 12. Элементы сети H.323

## Мониторинг и управление в сетях NGN

Одной из главных особенностей систем управления NGN является открытая модульная архитектура, позволяющая разрабатывать и внедрять новые модули, работать с существующими приложениями и модернизировать существующие модули. С точки зрения управления и мониторинга, сети NGN будут состоять из большего числа разнотипных компонентов, а не из сравнительно небольшого количества менее разнообразных крупных коммутационных устройств, как сейчас.

Основные требования, предъявляемые к системам управления NGN [4]:

- соответствие концепции TMN;
- структуры открытых систем должны обеспечивать гибкость реализации и совместимость с другими решениями, высокую надежность, и как результат – качество обслуживания;
- оператор должен иметь возможность модифицировать программное обеспечение для реализации специфических функций и вводить новые услуги через изменение конфигурации;
- компонентные решения упростят возможности оператора по введению новых пользователей и функций;
- масштабируемость и гибкость, позволяющие легко адаптироваться к быстро появляющимся новым технологиям и продуктам, а также к изменяющимся потребностям абонентов.

Система управления NGN строиться на основе решений, обеспечивающих управление сетями, реализованных на базе различных технологий (фиксированные и мобильные телефонные сети, сети передачи данных, сигнализации и т.д.), предоставляющих различные услуги и построенных на оборудовании различных производителей. Для организации управления сетями NGN взаимодействие систем управления, принадлежащих различным операторам и поставщикам услуг, организуется на основе концепции TMN. Для централизации мониторинга сети NGN они могут

объединяться в интегрированные подсистемы управления транспортной сетью и услугами с вышестоящей системой мониторинга и управления [4].

Модульная структура системы управления предполагает наличие интегрированных блоков, выполняющих различные задачи управления и мониторинга:

- аварийный надзор;
- управление топологией;
- мониторинг и управление безопасностью;
- управление системами и процессами.

Данные интегрируют функции отдельных подсистем управления, например, отображение аварий от нескольких областей управления на одном и том же пользовательском интерфейсе, отображение всей топологии, обеспечение общего управления безопасностью. Управление качеством осуществляется на уровне управления вызовом и внутри пакетной сети. Вышестоящая система мониторинга над подсистемами управления обеспечивает централизованное управление авариями и сетевой топологией.

## Вывод

Сети следующего поколения NGN являются «надстройкой» над существующими технологиями транспортных сетей и позволяют обеспечить операторам гибкость управления сетевыми услугами за счет решения следующих задач:

- создание единой информационной среды оператора связи;
- формирование распределенных прозрачных и гибких мультисервисных сетей;
- оптимизация управления IT-инфраструктурой;
- использование современных сервисов управления вызовами;
- предоставление мультисервисных услуг;
- управление услугами в реальном времени;
- поддержка мобильных пользователей;
- мониторинг качества предоставляемых услуг и работы сетевого оборудования.

Дальнейшее развитие архитектуры и протоколов для NGN, на наш взгляд, должно концентрироваться на следующих аспектах:

- рассмотрение использования техники эталонного моделирования;
- определение, как могут быть поддержаны на гетерогенных сетях службы из конца в конец, управление вызовом и мобильность пользователя;
- определение функций взаимодействия для поддержания действующих терминалов, не способных работать на NGN;
- определение функциональности терминалов, способных работать на NGN, через механизм обновления программного обеспечения, резервирования и эволюции терминалов, согласование версии и управление.

## Литература

1. Букрина Е. В. Сети связи и системы коммутации: Учебное пособие. – Екатеринбург: УрТИСИ ГОУ ВПО «СибГУТИ», 2007. – 186 с.

2. Recommendation ITU-T Y.2011. General principles and general reference model for next generation networks. 2004. URL: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2021-200609-I!!PDF-E&type=items (дата доступа: 10.12.2015).

3. Сети следующего поколения NGN / Под ред. А. В. Рослякова. – М.: Эко-Трендз, 2001. – 282 с.

4. Принципы построения и функционирования сетей NGN // NGN Laboratory [Электронный ресурс]. URL: http://ngn-lab.ru/principy-postroeniya-i-funkcionirova / (дата доступа: 10.12.2015).

5. Бакланов И. Г. NGN: принципы построения и организации / под ред. Ю.Н. Чернышова. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 400 с.

## References

1. Bukrina E. V. *Seti sviazi i sistemy kommutatsii* [Communication network and switching system]. Ekaterinburg, Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences, 2007. 186 p. (in Russian).

2. Recommendation ITU-T Y.2011. General principles and general reference model for next generation networks. 2004. Available at: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-Y.2021-200609-I!!PDF-E&type=items (accessed 10 December 2015).

3. Rosliakov A. V. *Seti sleduiushchego pokoleniia NGN* [Next Generation Networks]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2001. 282 p. (in Russian).

4. Printsipy postroeniia i funktsionirovaniia setei NGN [The principles of construction and operation of NGN networks]. *NGN Laboratory*, Available at: http://ngn-lab.ru/principy-postroeniya-i-funkcionirova (accessed 10 December 2015) (in Russian).

5. Baklanov I. G. *NGN: Printsipy postroeniia i organizatsii* [NGN: principles of construction and organization]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2008. 400 p. (in Russian).

**Статья поступила 15 декабря 2015 г.**

## Информация об авторах

*Макаренко Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

*Чаленко Николай Николаевич* – Инженер контрольно проверочной группы обеспечения точностных характеристик системы управления вооружением Су-27. В/ч 75386. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи. E-mail: chalenko2264@mail.ru

*Крылов Алексей Геннадьевич* – Инженер отдела. В/ч 65372. Область научных интересов: мониторинг систем связи. E-mail: 35leksei69rus@rambler.ru

Адрес: Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

---

## Next Generation Networks

S. I. Makarenko, N. N. Chalenko, A. G. Krylov

***Statement of the problem****. The development of new technologies of network integration on a common platform of telecommunications services are very important, because there are many factors: the convergence of networks, develop new services, new systems and technologies in the field of telecommunications and Informatics.* ***The aim of the study*** *is to analyze the applicability of the next generation networks (NGN) technology for the convergence of modern telecommunication systems that will allow operators to provide new services. Also preparation of proposals for the convergence of transport networks deployed by different operators and providers is an additional goal of the purpose.* ***Result.*** *The study showed that unified communication space of operators which brings together networks based on different technologies of transport networks can be created based on the concept of NGN. IP/MPLS networks will be the basis of such a space. Also, resource management methods, which are adopted in the NGN will provide for the development of new communication services.* ***Practical relevance.*** *Network H.323 is considered as an example of the application of the concept of NGN to create a communication space of the operator, which specializes in the provision of services to voice and video.*

***Key words:*** *convergence of networks, next generation networks, NGN, H.323.*

## Information about Authors

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E–mail: mak-serg@yandex.ru

*Nikolai Nikolaevich Chalenko* – Engineer at the Service Group (Sighting-Navigation Complex) of Aviation Engineering Service of the Aviation Squadron. Military Unit N 75386 of Russia's Armed Forces. Field of research: stability of networks and communication systems. E-mail: chalenko2264@mail.ru

*Aleksei Gennad'evich Krylov* – Engineer of the Department. Military Unit N 65372 of Russia's Armed Forces. Field of research: monitoring of communication systems. E-mail: 35leksei69rus@rambler.ru

Address: Russia, 197198, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya str., 13.

УДК 519.854.33

# Поисковые алгоритмы условной псевдобулевой оптимизации

Антамошкин А. Н., Масич И. С.

***Постановка проблемы:*** *рассматриваются задачи оптимизации вещественных функций бинарных переменных – так называемые задачи псевдобулевой оптимизации. В большинстве практических задач на комбинации значений переменных накладываются ограничения, сужающие множество допустимых значений управляющих переменных. В то же время эти ограничения, как и сама целевая функция, зачастую обладают конструктивными свойствами, учет которых в процессе оптимизации способен повысить эффективность решения таких задач. Кроме того, во многих реальных задачах оптимизации часть функций (критерии и ограничения), либо все функции, заданы алгоритмически, что делает невозможным применение к ним стандартных алгоритмов и требует разработки поисковых процедур оптимизации.* ***Цель работы*** *– обоснование, построение и исследование методов решения задач условной псевдобулевой оптимизации с алгоритмически заданными функциями.* ***Используемые методы:*** *исследуются свойства пространства булевых переменных и выявляются закономерности поведения псевдобулевых функций в пространстве булевых переменных. Разрабатываются точные регулярные алгоритмы, реализующие свойства конкретных классов задач. При построении регулярных алгоритмов рассматриваются классы унимодальных, монотонных и структурно монотонных псевдобулевых функций. Для задач больших размерностей исследуются алгоритмы оптимизации на основе метода случайного поиска, осуществляющие поиск среди граничных точек допустимой области.* ***Результаты:*** *разработаны новые точные алгоритмы с аналитическими оценками трудоемкости для решения задач условной псевдобулевой оптимизации, реализующие информационную сложность классов задач. Также построены новые приближенные алгоритмы для условной оптимизации монотонных псевдобулевых функций с большим числом переменных.* ***Практическая значимость:*** *разработанные алгоритмы применимы для решения любых практических задач, сводящихся к задачам оптимизации псевдобулевых функций. Так, решена задача оптимизации загрузки производственных мощностей литейного производства. Разработанные алгоритмы применяются для нахождения логических закономерностей (используемых для построения классификаторов) в данных, что представляет собой задачу условной псевдобулевой оптимизации большой размерности.*

***Ключевые слова****: псевдобулевые функции, оптимизация, случайный поиск, гриди алгоритм, регулярный алгоритм оптимизации.*

## Введение

Вещественные функции, определенные на множестве булевых переменных, по аналогии с булевыми функциями принято называть *псевдобулевыми* [1]. Соответственно, задачи оптимизации псевдобулевых функций называются *задачами псевдобулевой оптимизации*.

Многие проблемы в экономике, банковском деле, промышленности, а также проблемы управления сложными техническими объектами приводят к необходимости решения задач условной оптимизации с булевыми переменными. В работе [2] рассматривается проблема автоматизации планирования товарного ассортимента торговых предприятий, которая сводится к решению многокритериальной задачи псевдобулевой оптимизации с ограничениями. Задача нахождения набора кредитных заявок (задача формирования кредитного портфеля банка) решается как поток задач условной оптимизации псевдобулевых функций [3]. Большое внимание в последнее время уделяется задаче оптимального проектирования структуры

отказоустойчивых систем управления с использованием подхода мультиверсионного программирования, формулируемой в виде задачи условной псевдобулевой оптимизации [4, 5]. Для ее решения построен ряд оптимизационных моделей, в которых максимизируется критерий надежности с учетом стоимостного ограничения. Структура определяется набором булевых переменных, по которым и происходит максимизация критерия. В основном для решения таких задач нашли применение алгоритмы случайного поиска, например, алгоритмы схемы метода изменяющихся вероятностей [6]. В некоторых работах [7, 8] были предприняты попытки построения регулярных алгоритмов.

Псевдобулевые функции играют важную роль в оптимизационных моделях в различных областях, таких как проектирование [9-12], теория надежности [13], теория вычислительных систем [14], статистика (классификация) [15-17], экономика [18, 19], финансы [20-22], менеджмент [23-25], исследование операций [26], дискретная математика (оптимизация на графах [27, 28]), промышленность (календарное планирование и составление расписания [29-31]).

Помимо задач оптимизации, псевдобулевые функции также появились во многих других моделях, представляющих интерес в настоящее время. Они составляют, к примеру, основной объект исследования в теории кооперативных игр, где они рассматриваются как характеристические функции игр с побочными платежами [32, 33]. Псевдобулевые функции встречаются в комбинаторной теории как функции ранга матроидов [34, 35] или как функции, связанные с определенными параметрами графа, такими как число стабильности, хроматическое число и т.д. [36-38].

Оптимизация псевдобулевых функций используется в распознавании образов, как при отборе информативных признаков [39-41], так и при построении классификаторов [42, 43].

## Состояние проблемы

Впервые задачи псевдобулевой оптимизации подробно исследовались в монографии [44]. В этой работе также были разработаны методы решения аналитически заданных задач псевдобулевой оптимизации.

В работе [45] псевдобулевые функции рассматриваются как функции множеств, т.е. функции, отображающие семейство подмножеств конечного исходного множества во множество действительных чисел.

Функции множеств зачастую а заданными алгоритмом, способным выдавать их значения для любого подмножества заданного конечного исходного множества. В некоторых задачах функция множества может быть определена аналитическим выражением, что является весьма благоприятным случаем.

Явное задание функций множеств делает возможным применение большого числа методов для их анализа и оптимизации. Считается, что любая функция множеств, определенная на конечном исходном множестве, допускает аналитический способ задания. Однако в некоторых случаях определение

аналитического выражения может быть значительно более трудоемкой процедурой, чем решение исходной задачи.

Эта работа сосредоточена на тех функциях множеств, которые определены на конечном исходном множестве, представляющем собой множество булевых переменных, и не имеют известного аналитического задания. Особое внимание уделено специальным классам – монотонные и унимодальные псевдобулевые функции.

Известно несколько эффективных схем для решения задач, в которых целевая функция и ограничения заданы аналитическими выражениями. Это алгебраические методы [46-61] (наиболее известный - базовый алгоритм Хаммера [44, 45]), в том числе методы линеаризации [62-66], методы квадратичной оптимизации [67-72]; различные методы с применением релаксации [73].

В практических задачах очень часто целевая функция, а иногда и ограничения заданы алгоритмом или наблюдаются на выходе реальной системы [74]. Это обстоятельство исключает возможность практического применения стандартных процедур математического программирования, опирающихся на известную структуру и вид целевой функции и ограничений. Именно для таких случаев разрабатываются поисковые методы.

Обратим внимание на общую структуру поискового метода [75, 76]. *Алгоритм решения задачи оптимизации* представляет собой последовательную процедуру, имеющую рекуррентный характер. Это означает, что процесс поиска состоит из повторяющихся этапов, каждый из которых определяет переход от одного решения к другому, лучшему, что и образует процедуру последовательного улучшения решения:

$$X_0 \to X_1 \to \ldots \to X_N \to X_{N+1} \to \ldots$$

В этой последовательности каждое последующее решение в определенном смысле лучше, предпочтительнее предыдущего, т. е.

$$X_N \succ X_{N-1},\ N = 1,2,\ldots$$

Алгоритм поиска оптимального решения, таким образом, связывает следующие друг за другом решения. В простейшем случае

$$X_N = F(X_{N-1}),$$

где $F$ – алгоритм поиска, указывающий, какие операции следует сделать в одной точке $X_{N-1}$, чтобы получить следующую $X_N$, более предпочтительную.

Рассмотрим специфику поискового алгоритма $F$. Вполне очевидно, что информации в точке $X_{N-1}$совершенно недостаточно для перехода в другую, лучшую точку $X_N$. Необходимо иметь информацию о поведении оптимизируемой функции $f(X)$ и ограничения $S$ в области точки $X_{N-1}$. Без этого нельзя составить разумный алгоритм $F$, обеспечивающий условие улучшения.

Поисковый алгоритм для решения оптимизационной задачи состоит обычно из двух этапов: сбор информации о поведении целевой функции и ограничений, часто посредством пробных шагов, и осуществление рабочего

шага. Возможны и отклонения от этой схемы, когда оба этапа совмещены и неразделимы, но при этом обязательно сохраняются.

В оптимизации для функций, заданных алгоритмически, широкое распространение получили адаптивные поисковые процедуры [77-80] – эволюционные и генетические алгоритмы, алгоритм имитации отжига. Однако эти алгоритмы требуют настройки большого числа параметров, к тому же отсутствуют аналитические оценки точности таких алгоритмов. Большое распространение в последнее время получили стохастические и локально-стохастические алгоритмы, разрабатываемые для конкретных классов задач [61, 81-84].

Для конкретных классов задач безусловной псевдобулевой оптимизации разработаны точные регулярные поисковые алгоритмы, в том числе и неулучшаемые [85-88]. В частности, точное определение минимума произвольной строго монотонной унимодальной псевдобулевой функции требует вычисления значений функции в $(n+1)$-ой точке пространства булевых переменных $B_2^n$.

Однако на практике редко встречаются задачи без ограничений. Существующие в настоящее время методы решения задач с ограничениями либо не имеют эффективных оценок трудоемкости (исключающих полный перебор), либо не имеют априорных оценок точности. Всевозможные методы решения задач с ограничениями на переменные различаются в значительной степени способами учета ограничений. Методы, связанные со сведением условной задачи к безусловной, т. е. методы типа штрафных функций, обычно не учитывают специфику ограничений и приводят к появлению других, не менее существенных трудностей типа овражности и многоэкстремальности штрафной функции [89, 90]. Поэтому необходима разработка методов, в полной мере учитывающих и выявляющих специфику и особенность ограничений.

В задачах псевдобулевой оптимизации допустимое множество решений конечно, поэтому существует универсальный способ отыскания оптимального решения посредством полного перебора всех допустимых решений. Однако такой алгоритм поиска применим только в тех исключительных случаях, когда мощность множества допустимых решений сравнительно невелика. В интересных с практической точки зрения задачах, как правило, мощность множества допустимых решений быстро (например, экспоненциально) растет с увеличением размерности (объема исходных данных) задачи. Это приводит к тому, что в задачах реальной размерности количество допустимых решений становится величиной астрономического порядка, что делает перебор практически невозможным. Назначение теории задач псевдобулевой оптимизации – создание работоспособных в практическом смысле алгоритмических инструментов решения задач.

Среди комбинаторных оптимизационных задач, частью которых являются и задачи псевдобулевой оптимизации, можно выделить *полиномиально разрешимые* и *NP*-трудные. Для каждой полиномиально разрешимой задачи известен по крайней мере один эффективный алгоритм ее

решения, то есть точный алгоритм, трудоемкость которого (время решения) ограничена сверху некоторым полиномом от размера входных данных задачи. Никакую *NP*-трудную задачу нельзя решить никаким известным полиномиальным алгоритмом. Во всяком случае, если бы существовал полиномиальный алгоритм решения какой-нибудь одной *NP*-трудной задачи, то существовали бы полиномиальные алгоритмы для всех *NP*-трудных задач.

Более подробно с вопросами оценки сложности алгоритмов и теорией полиномиальной сводимости комбинаторных задач можно ознакомиться в монографиях [73, 91-93].

К сожалению, почти все естественные и интересные постановки задач условной псевдобулевой оптимизации оказываются *NP*-трудными, поэтому попытки построения точных и полиномиальных алгоритмов для этих задач вероятней всего обречены на неудачу.

Рассмотрим наиболее известные методы, используемые в настоящее время для решения задач условной псевдобулевой оптимизации. Их можно подразделить на точные (комбинаторные) и приближенные.

Точные методы, очевидно, являются всегда детерминированными, т.е. при одинаковых исходных данных задачи выдают одинаковый результат – оптимальное решение задачи.

*Метод ветвей и границ* с использованием решения релаксированной задачи для получения нижних границ. Для этого метода необходимо получение значений функций вне точек целочисленной решетки, что ограничивает его применение для задач с неявным заданием функций. Кроме того, нет оценок трудоемкости алгоритмов, основанных на схеме метода ветвей и границ. Показано лишь, что существуют задачи, число ветвлений в которых (т.е. число решаемых релаксированных задач) незначительно отличается от полного перебора.

*Метод динамического программирования* получил большое распространение при решении аддитивных (сепарабельных) задач математического программирования. Основу этого метода составляет принцип оптимальности Беллмана. Смысл этого принципа состоит в том, что оптимальная стратегия при любом первоначальном состоянии и любом первоначальном решении предполагает, что последующие решения должны быть определены относительно состояния, полученного в результате предыдущего решения. Алгоритм динамического программирования при решении задачи линейного целочисленного программирования имеет псевдополиномиальные оценки трудоемкости. Но этот метод не нашел применения при решении задач с алгоритмически заданными функциями.

*Алгебраические методы*: базовый алгоритм Хаммера для решения задач линейного программирования с булевыми переменными и его модификации, алгоритмы квадратичной оптимизации для решения задач квадратичного программирования с булевыми переменными, методы линеаризации, позволяющие решать задачи оптимизации нелинейных псевдобулевых функций. Эти методы предназначены для задач с аналитически заданными целевыми функциями и ограничениями. Алгебраические методы в наиболее

полной мере используют структуру заданных функций, составляющих постановку задачи. В основном эти алгоритмы рассматривают задачи безусловной псевдобулевой оптимизации и задачи условной оптимизации с линейными и квадратичными псевдобулевыми целевыми функциями и ограничениями.

*Аппроксимационно-комбинаторные методы* решения задач псевдобулевой оптимизации. Эти методы основаны на построении аппроксимирующей функции для целевой функции на множестве допустимых значений. Использование такого подхода принципиально затруднено при алгоритмическом задании целевых функций и ограничений.

Точные поисковые алгоритмы псевдобулевой оптимизации, не требующие аналитического задания функций, были построены для решения произвольных задач безусловной псевдобулевой оптимизации. Эти алгоритмы в наиболее полной мере учитывают специфику решаемых классов задач и являются существенно не улучшаемыми. Одной из основных задач данной работы является построение точных поисковых алгоритмов для решения задач условной псевдобулевой оптимизации.

Рассмотрим основные аспекты разработки и исследования приближенных алгоритмов дискретной и псевдобулевой оптимизации [94-97].

Как уже отмечалось выше, интересующие нас задачи являются *NP*-трудными. Это означает, что построение точных полиномиальных алгоритмов невозможно. Одним из основных направлений исследования таких задач является построение приближенных алгоритмов с априорными оценками их точности. Такие алгоритмы не для всякой индивидуальной задачи находят оптимальное решение, но всегда отыскивают допустимое решение задачи, которое удовлетворяет некоторым требованиям по точности, установленными еще до получения приближенного решения.

Существуют два наиболее распространенных подхода к анализу приближенных алгоритмов и определению их точности: анализ поведения в худшем случае и вероятностный анализ поведения алгоритма. При *анализе в худшем случае* оценивается погрешность алгоритма на наихудшей из возможных индивидуальной задаче, а в случае *вероятностного анализа* предполагается, что на множестве индивидуальных задач задано некоторое вероятностное распределение и оценивается математическое ожидание погрешности алгоритма на этом распределении.

Необходимость разработки приближенных алгоритмов связана также с тем, что существуют задачи дискретной оптимизации, для нахождения точного решения которых необходимо перебрать все допустимые решения задачи, т.к. одно допустимое решение не имеет никаких априорных преимуществ перед другим. Таким образом, для решения таких задач нет каких-либо точных процедур кроме полного перебора множества допустимых решений. Одной из подобных задач является задача вида

$$\begin{cases} f(X) \to \max\limits_{X \in B_2^n}, \\ \sum\limits_{j=1}^{n} x_j = m, \end{cases} \quad m < n,$$

со множеством допустимых значений

$$S = \{X \in B_2^n : \sum_{j=1}^{n} x_j = m\}.$$

Задача содержит

$$C_n^m = \frac{n!}{m!(n-m)!}$$

допустимых решений. К данному виду сводится, например, задача выбора системы информативных факторов [6, 39-40, 98, 99].

## Свойства псевдобулевых функций

*Определение 1.* *Псевдобулевой функцией* называют вещественную функцию на множестве булевых переменных: $f : B_2^n \to R^1$, где $B_2 = \{0,1\}$, $B_2^n = B_2 \times B_2 \times \cdots \times B_2$. [85].

Псевдобулевые функции можно рассматривать как функции множеств [45]. Так как существует взаимно однозначное соответствие между подмножествами множества $N = \{1,2,\ldots,n\}$ и элементами $B_2^n$, то любая псевдобулевая функция может быть интерпретирована как вещественная *функция множеств,* определенная на *P(N),* показательном множестве множества $N = \{1,2,\ldots,n\}$, т.е. ставит вещественное число в соответствии каждому подмножеству конечного множества. Интерпретация псевдобулевой функции *f* как функции множеств выделяет тот факт, что значения *f* получены некоторым неявным путем.

Любая псевдобулевая функция $f(x_1,\ldots,x_n)$ может быть единственным образом представлена как *мультилинейный полином* вида

$$f(x_1,\ldots,x_n) = c_0 + \sum_{k=1}^{m} c_k \prod_{i \in A_k} x_i, \tag{1}$$

где $c_0, c_1,\ldots,c_m$ – вещественные коэффициенты, $A_1, A_2,\ldots,A_m$ – непустые подмножества $N = \{1,2,\ldots,n\}$ [45].

Кроме того, любая псевдобулевая функция может быть представлена в виде

$$f(x_1,\ldots,x_n) = b_0 + \sum_{k=1}^{m} b_k \left( \prod_{i \in A_k} x_i \prod_{j \in B_k} \bar{x}_j \right), \tag{2}$$

где $b_0, b_1,\ldots,b_m$ – вещественные коэффициенты, $\bar{x}_j = 1 - x_j$, $j = \overline{1,n}$. Если $b_k \geq 0$, $k = \overline{1,m}$, то выражение (2) является *позиформой* функции *f*. Любая псевдобулевая функция может быть записана в виде позиформы.

Другие представления псевдобулевых функций представлены в работах [100, 101].

Таким образом, любую псевдобулевую функцию теоретически можно записать в виде алгебраического выражения. Однако при нелинейности ($c_k \neq 0$ при $|A_k| > 1$ в выражении (1) или $b_k \neq 0$ при $|A_k| + |B_k| > 1$ в (2)) запись функции в явном виде может потребовать вычисления функции в точках, количество которых экспоненциально растет с ростом размерности *n*, и, соответственно, может являться более трудоемкой задачей, чем оптимизация алгоритмически заданной функции. Это обуславливает необходимость изучения свойств псевдобулевых функций, не имеющих явного задания, и разработки поисковых алгоритмов оптимизации.

Введем основные определения и понятия [85].

*Определение 2*. Точки $X^1, X^2 \in B_2^n$ назовем *k-соседними*, если они отличаются значением *k* координат, $k = \overline{1, n}$. 1-соседние точки будем называть просто *соседними*.

*Определение 3.* Множество $O_k(X)$, $k = \overline{0, n}$, всех точек $B_2^n$, *k*-соседних к точке $X$, назовем *k-м уровнем* точки $X$. При этом $O_0(X) = X$.

*Лемма 1.* $\forall X \in B_2^n : card\ O_k(X) = C_n^k$, где $C_n^k$ – число сочетаний из *n* по *k*.

*Лемма 2.* $\forall X \in B_2^n : B_2^n = \bigcup_{k=0}^{n} O_k(X)$.

Таким образом, множество всех точек $B_2^n$ можно представить в виде последовательности уровней $O_k(X)$, $k = \overline{0, n}$, какой-либо точки *X*, каждый из которых состоит из $C_n^k$ точек (рис. 1).

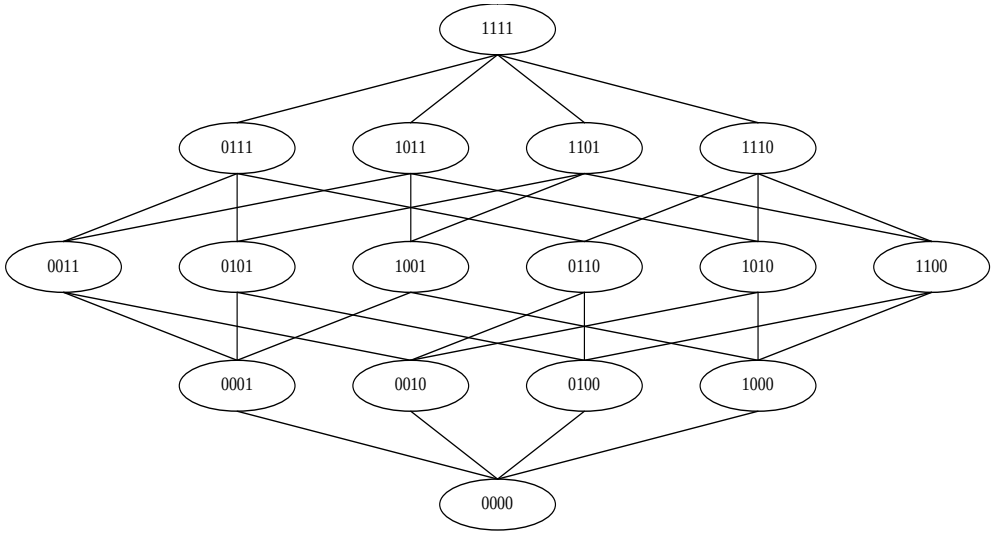



Рис. 1. Условное графическое представление пространства $B_2^n$, *n*=4

*Лемма 3.* $\forall X^k \in O_k(X),\ X \in B_2^n,\ k=\overline{0,n}$:

$$card\{O_1(X_k) \cap O_{k-1}(X)\} = k,$$
$$card\{O_1(X_k) \cap O_{k+1}(X)\} = n-k.$$

*Определение 4.* Множество точек $W(X^0, X^l) = \{X^0, X^1, \ldots, X^l\} \subset B_2^n$ назовем *путем* между точками $X^0$ и $X^l$, если $\forall\ i = 1, \ldots, l$ точка $X^i$ является соседней к $X^{i-1}$.

*Определение 5.* Путь $W(X^0, X^l) \subset B_2^n$ между $k$-соседними точками $X^0$ и $X^l$ назовем *кратчайшим*, если $l = k$.

*Определение 6.* Множество $A \subset B_2^n$ назовем *связным множеством*, если $\forall X^0, X^l \in A$ существует путь $W(X^0, X^l) \subset A$.

*Определение 7.* $\forall X, Y \in B_2^n$ объединение всех кратчайших путей $W(X,Y)$ будем называть *подкубом* $B_2^n$ и обозначать $K(X,Y)$.

Для того чтобы определить, принадлежит ли точка подкубу, воспользуемся следующим свойством.

*Свойство 1.* Точка $Z \in B_2^n$ принадлежит подкубу $K(X,Y)$, если $z_i = x_i$ для $\forall i : x_i = y_i$.

*Лемма 4.* $\forall X^k \in O_k(X), X \in B_2^n, k = \overline{0,n}$: $O_k(X) \subset \bigcup_{l=0}^{N} O_{2l}(X^k)$, где $N = \min\{k, n-k\}$, а $card(O_{2l}(X^k) \cap O_k(X)) = C_k^l \cdot C_{n-k}^l\ \ \forall l = \overline{0,N}$.

Ниже рассматриваются понятия модальности и монотонности, на основании которых проводится классификация псевдобулевых функций, а также основные свойства выделяемых классов [85].

*Определение 8.* Точку $X^* \in B_2^n$, для которой $f(X^*) < f(X), \forall X \in O_1(X^*)$, назовем *локальным минимумом* псевдобулевой функции *f*.

*Определение 9.* Псевдобулевую функцию, имеющую только один локальный минимум, будем называть *унимодальной* на $B_2^n$ функцией.

*Определение 10.* Унимодальную функцию *f* назовем *монотонной* на $B_2^n$, если $\forall X^k \in O_k(X^*), k = \overline{1,n}$: $f(X^{k-1}) \le f(X^k)$, $\forall X^{k-1} \in O_{k-1}(X^*) \cap O_1(X^k)$, и *строго монотонной*, если это условие выполняется со знаком строгого неравенства.

*Определение 11*. Унимодальную функцию *f* назовем *разнозначной* на $B_2^n$, если для каждого кратчайшего пути $W(X^0, X^l)$, $X^0 \in B_2^n$, $X^l = X^*$: $f(X^i) \ne f(X^j)$ при $i \ne j$, $X^i, X^j \in W(X^0, X^l)$, $i, j = \overline{0,l}$.

*Определение 12*. Произвольную унимодальную функцию *f*, для которой условие монотонности нарушается, по крайней мере, в одной точке $B_2^n$, будем называть *немонотонной* на $B_2^n$.

*Определение 13.* Путь $W^f(X^0, X^l) \subset B_2^n$ назовем *путем невозрастания* функции $f$, если $\forall X^i, X^{i-1} \in W^f(X^0, X^l)$, $i = 1,2,\ldots,l: f(X^i) \le f(X^{i-1})$, и *путем убывания* функции, если неравенство выполняется со знаком строгого неравенства.

*Замечание 1*. Из определений 11 и 13 следует, что произвольная (разнозначная) функция монотонна (строго монотонна) на $B_2^n$, если $\forall X \in B_2^n$ все пути ее невозрастания (убывания), начинающиеся в точке $X^0$, являются кратчайшими до $X^*$.

*Лемма 5*. Для любой унимодальной на $B_2^n$ функции $f$ в каждой точке $X \in B_2^n \setminus \{X^*\}$ среди точек $X_j^1 \in O_1(X)$, $j = \overline{1,n}$, существует, по крайней мере, одна точка $X_{j_i}^1$ такая, что $f(X_{j_i}^1) \le f(X)$.

*Следствие 1*. Если $f$ – унимодальная на $B_2^n$ функция, то $\forall X \in B_2^n \setminus \{X^*\}$ существует по крайней мере один путь ее невозрастания $W^f(X, X^*)$.

*Лемма 6.* Если $f$ – унимодальная на $B_2^n$ функция, то

$$\min_{X_j^k \in O_k(X^0)} f(X_j^k) \le \min_{X_j^{k+1} \in O_{k+1}(X^0)} f(X_j^{k+1}).$$

*Определение 14.* Унимодальную немонотонную на $B_2^n$ функцию $f$ назовем *слабо немонотонной*, если $\forall X^k \in O_k(X^*)$, $k = \overline{1,n}$, точка $X_{\min}^1$ такая, что

$$f(X_{\min}^1) = \min_{X_j^1 \in O_1(X^k)} f(X_j^1),$$

принадлежит $O_{k-1}(X^*)$.

*Замечание 2.* Из определения 14 следует, что необходимым и достаточным условием слабой немонотонности немонотонной на $B_2^n$ функции $f$ является: $\forall X^0 \in B_2^n$ путь $W_{\min}^f(X^0, X^*)$ – кратчайший.

*Определение 15.* Унимодальную псевдобулевую функцию $f$ назовем *(строго) структурно монотонной*, если для $\forall X \in O_l(X^*)$, $\forall Y \in O_m(X^*)$, $l < m$, выполняется $f(X) \le f(Y)$ ($f(X) < f(Y)$).

*Определение 16*. Псевдобулевая функция, имеющая более одного локального минимума, называется *полимодальной* на $B_2^n$ функцией.

*Замечание 3.* Из определений 10 и 15 следует, что структурно-монотонная функция является монотонной функцией.

Пример унимодальной и монотонной псевдобулевой функции дает следующая лемма.

*Лемма 7.* Полином от булевых переменных

$$\varphi(x_1,\ldots,x_n) = \sum_{j=1}^{m} a_j \prod_{i \in \beta_j} x_i,$$

где $\beta_j \subset \{1,\ldots,n\}$, является унимодальной и монотонной псевдобулевой функцией при $a_j \geq 0$, $j = \overline{1,m}$.

## Постановка задачи условной псевдобулевой оптимизации

**Формальная постановка задачи условной псевдобулевой оптимизации выглядит следующим образом:**

$$f(X) \to extr, \tag{3}$$

где

$$f : S \to R^1, \tag{4}$$

а $S \subset B_2^n$ – некоторая подобласть пространства булевых переменных, определяемая заданной системой ограничений.

В данной работе рассматривается задача вида

$$\begin{cases} C(X) \to \max\limits_{X \in B_2^n}, \\ A_j(X) \leq H_j,\ j = \overline{1,m}, \end{cases} \tag{5}$$

где $C(X)$ и $A_j(X)$ – псевдобулевые функции, обладающие некоторыми конструктивными свойствами (модальность, монотонность и т.п.).

Задача (5) является *NP*-полной задачей дискретной оптимизации, т.е. ее нельзя решить никаким известным полиномиальным алгоритмом.

Для простоты изложения результатов и описания работы алгоритмов в дальнейшем часто будем рассматривать задачу с одним ограничением

$$A(X) \leq H. \tag{6}$$

Рассмотрим свойства множества допустимых решений рассматриваемой задачи.

*Определение 17.* Точка $Y \in \mathbf{A}$ является *граничной точкой* множества $\mathbf{A}$, если существует $X \in O_1(Y)$, для которой $X \notin \mathbf{A}$.

*Определение 18.* Точку $Y \in O_i(X^0) \cap \mathbf{A}$ будем называть *крайней точкой* множества $\mathbf{A}$ с базовой точкой $X^0 \in \mathbf{A}$, если $\forall X \in O_1(Y) \bigcap O_{i+1}(X^0)$ выполняется $X \notin \mathbf{A}$.

Пример расположения крайних точек множества приведен на рис. 2.

*Определение 19.* Ограничение, определяющее подобласть пространства булевых переменных, будем называть *активным*, если оптимальное решение задачи условной оптимизации не совпадает с оптимальным решением соответствующей задачи оптимизации без учета ограничения.

В дальнейшем будем рассматривать ситуацию, когда ограничение (или система ограничений), определяющее допустимую область пространства булевых переменных, является активным.

*Свойство 2*. Если ограничение является активным, то оптимальное решение принадлежит подмножеству граничных точек.

*Замечание 4.* Обратное не верно.

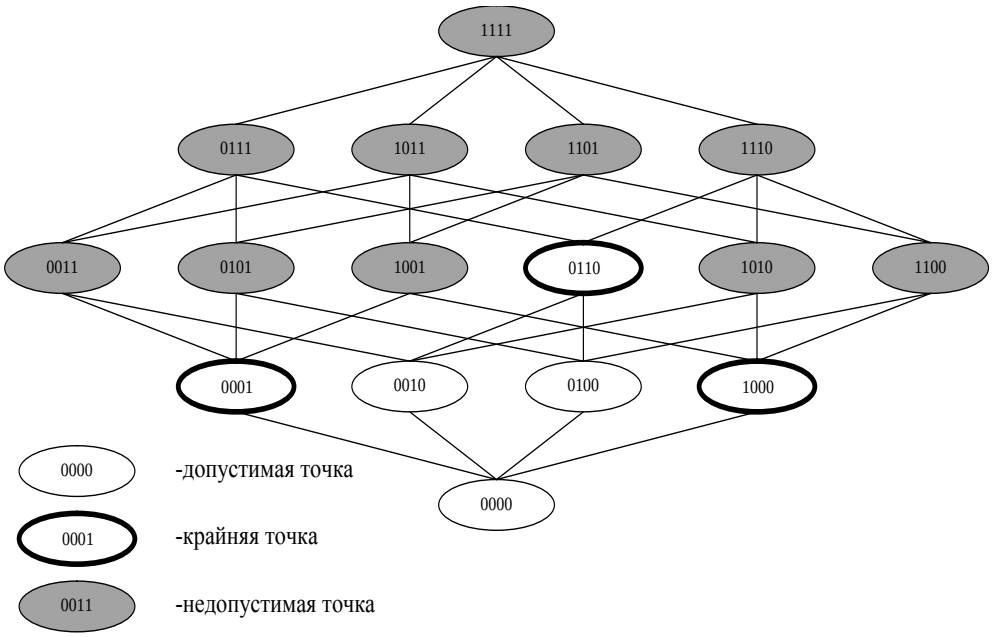



Рис. 2. Условное представление пространства $B_2^n$, $n$=4, $X^0=(0,...,0)$ – пример расположения крайних точек

*Теорема 1*. Если целевая функция является монотонной унимодальной функцией, а ограничение активно, то оптимальным решением задачи (5) будет точка, принадлежащая подмножеству крайних точек множества допустимых решений.

Рассмотрим задачу (5) с одним ограничением (6).

*Теорема 2.* Если функция ограничения (6) является унимодальной псевдобулевой функцией, то множество допустимых решений $S$ задачи (5) представляет собой связное множество.

*Лемма 8*. Количество крайних точек связного множества допустимых решений задачи (5)

$$s \le s_{\max} = C_n^{[n/2]},$$

где $[n/2]$ – целая часть числа $n/2$. В случае $s = s_{\max}$ все крайние точки расположены на $n/2$-ом уровне точки $X^0$ при четном $n$ и на $(n-1)/2$-ом (или $(n+1)/2$-ом) уровне при нечетном $n$.

При решении практических задач с алгоритмически заданными функциями в отдельных частных случаях свойства функций можно идентифицировать исходя из некоторых априорных сведений. Но во многих встречающихся на практике задачах принадлежность функции к какому-либо классу вовсе не очевидна, поэтому необходимо проводить идентификацию свойств функций посредством осуществления пробных шагов. Только после этого возможно применение соответствующего поискового алгоритма. В [102, 103] предлагается идентификация свойств псевдобулевых функций (заданных алгоритмически) посредством аппроксимации алгебраическими (квадратичными) полиномами. Свойства полиномов определяются исходя из значений их коэффициентов. Полинома второй степени достаточно для

описания рассматриваемых свойств. После того, как все функции идентифицированы, задачу можно решать соответствующим алгоритмом.

## Точные алгоритмы условной псевдобулевой оптимизации

Для построения регулярных алгоритмов проведем классификацию задач условной псевдобулевой оптимизации, основанную на конструктивных свойствах целевых функций и ограничений [104].

Рассматриваются классы задач вида

$$\begin{cases} C(X) \to \max\limits_{X \in B_2^n}, \\ A(X) \le H, \end{cases}$$

в которых целевая функция $C(X)$ и функция $A(X)$, определяющая систему ограничений, обладают определенными конструктивными свойствами.

При разработке регулярных алгоритмов рассматриваются следующие классы псевдобулевых функций:

– унимодальная;
– монотонная;
– структурно монотонная.

Всевозможным сочетанием классов целевых функций и классов функций ограничений получаются соответствующие классы задач условной псевдобулевой оптимизации.

Из определений монотонности и структурной монотонности функций следуют свойства:

*Свойство 3.* Если функция $f$ монотонно возрастает от $X^0 \in B_2^n$, то для любой точки $Y \in B_2^n$ выполняется:

a) $f(X) \le f(Y)$ для всех $X \in K(X^0, Y)$;

b) $f(X) \ge f(Y)$ для всех $X \in K(Y, X^1)$.

*Свойство 4*. Если функция $f$ структурно монотонно возрастает от $X^0 \in B_2^n$, то для любой точки $Y \in O_k(X^0)$ выполняется:

a) $f(X) \le f(Y)$ для всех $X \in O_l(X^0)$, $l < k$;

b) $f(X) \ge f(Y)$ для всех $X \in O_l(X^0)$, $l > k$.

Рассмотрим свойства целевых функций и функций ограничений, принадлежащих перечисленным выше классам. Эти свойства необходимо учитывать при построении регулярных алгоритмов.

В первую очередь рассмотрим *свойства функций ограничений*.

*Унимодальная функция ограничения* имеет единственный минимум в точке $X^0 \in B_2^n$. Обозначим $X^1 \equiv X \in O_n(X^0)$.

Согласно теореме 2 множество допустимых точек в этом случае является связным множеством.

*Свойство 5.* Из леммы 6 следует, что если функция $A(X)$ унимодальна и на уровне $O_k(X^0)$ нет допустимых точек, то их нет на уровне $O_l(X^0)$, где $l > k$.

*Следствие 2.* Если функция $A(X)$ унимодальна и на уровне $O_k(X^0)$ все точки являются недопустимыми или крайними, то на уровне $O_l(X^0)$, где $l > k$, нет допустимых точек (рис. 3).

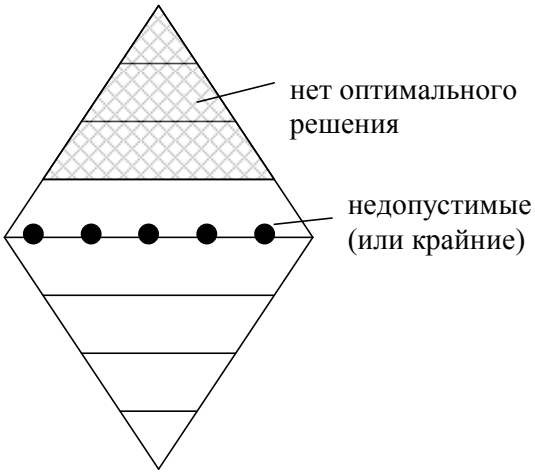



Рис. 3. Иллюстрация следствия 2

*Монотонная функция ограничения* возрастает от точки $X^0 \in B_2^n$.

*Свойство 6.*

a) если функция $A(X)$ монотонна и точка $Y \in B_2^n$ является допустимой (удовлетворяет ограничению $A(Y) \le H$), то любая точка $X \in K(X^0, Y)$ является также допустимой;

b) если функция $A(X)$ монотонна и точка $Y \in B_2^n$ является недопустимой (не удовлетворяет ограничению $A(Y) \le H$), то любая точка $X \in K(Y, X^1)$ является также недопустимой (рис. 4).

*Следствие 3.* Если функция $A(X)$ монотонна и точка $Y \in B_2^n$ является крайней точкой, то любая точка $X \in K(X^0, Y)$ не является крайней точкой, а также любая точка $X \in K(Y, X^1)$ не является крайней точкой (т.е. при поиске остальных крайних точек подкубы $K(X^0, Y)$ и $K(Y, X^1)$ можно исключить из рассмотрения).

*Следствие 4.* Если функция $A(X)$ монотонна и точки $X_1 \in O_{k_1}(X^0)$ и $X_2 \in O_{k_2}(X^0)$, $k_1 < k_2$, являются граничными точками, то на любом уровне $O_k(X^0)$, $k_1 < k < k_2$, существует хотя бы одна граничная точка.

*Структурно монотонная функция ограничения* возрастает от точки $X^0 \in B_2^n$.

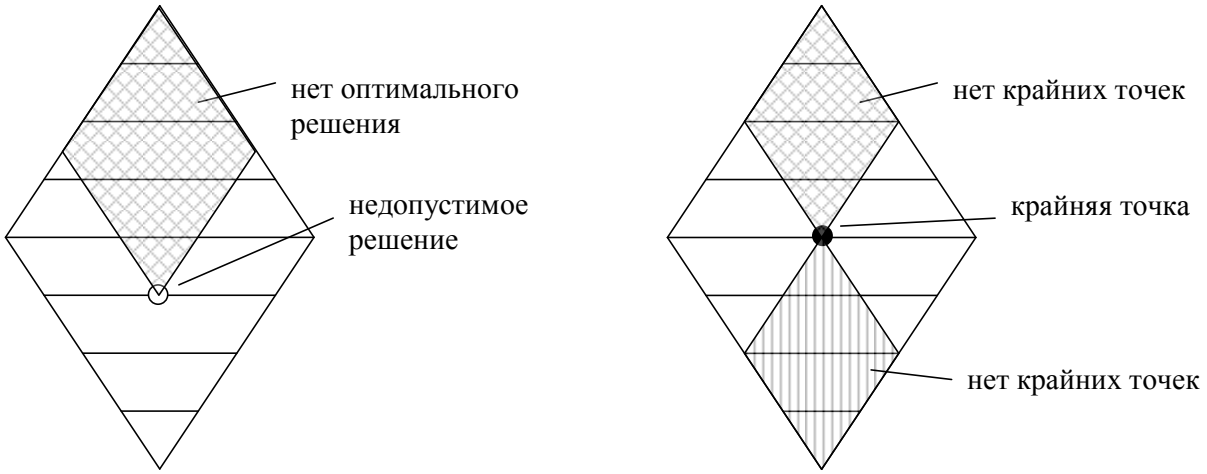



Рис. 4. Иллюстрации свойства 6

*Свойство 7.*

a) если функция $A(X)$ структурно монотонна и точка $Y \in O_k(X^0)$ является допустимой (удовлетворяет ограничению $A(Y) \le H$), то любая точка $X \in O_l(X^0)$, $l < k$, является также допустимой;

b) если функция $A(X)$ структурно монотонна и точка $Y \in O_k(X^0)$ является недопустимой (не удовлетворяет ограничению $A(Y) \le H$), то любая точка $X \in O_l(X^0)$, $l > k$, является также недопустимой (рис. 5).

*Следствие 5.* Если функция $A(X)$ структурно монотонна, то возможен один из двух вариантов:

a) существует такое $K$, $0 \le K \le n$, что:

$$\forall X \in O_k(X^0),\ k \le K:\ A(X) \le H;$$

$$\forall X \in O_k(X^0),\ k > K:\ A(X) > H;$$

в этом случае все граничные (а также крайние) точки принадлежат $O_K(X^0)$;

b) существует такое $K$, $0 \le K \le n$, что:

$$\forall X \in O_k(X^0),\ k < K:\ A(X) \le H;$$

$$\forall X \in O_k(X^0),\ k > K:\ A(X) > H;$$

$$\exists X \in O_K(X^0):\ A(X) \le H;\ \exists X \in O_K(X^0):\ A(X) > H;$$

в этом случае граничные (а также крайние) точки принадлежат $O_K(X^0) \cup O_{K-1}(X^0)$.

Далее рассмотрим *свойства целевых функций*.

*Унимодальная целевая функция* имеет единственный максимум в точке $X^1 \equiv X \in O_n(X^0)$.

Согласно свойству 2 оптимальное решение принадлежит подмножеству граничных точек.

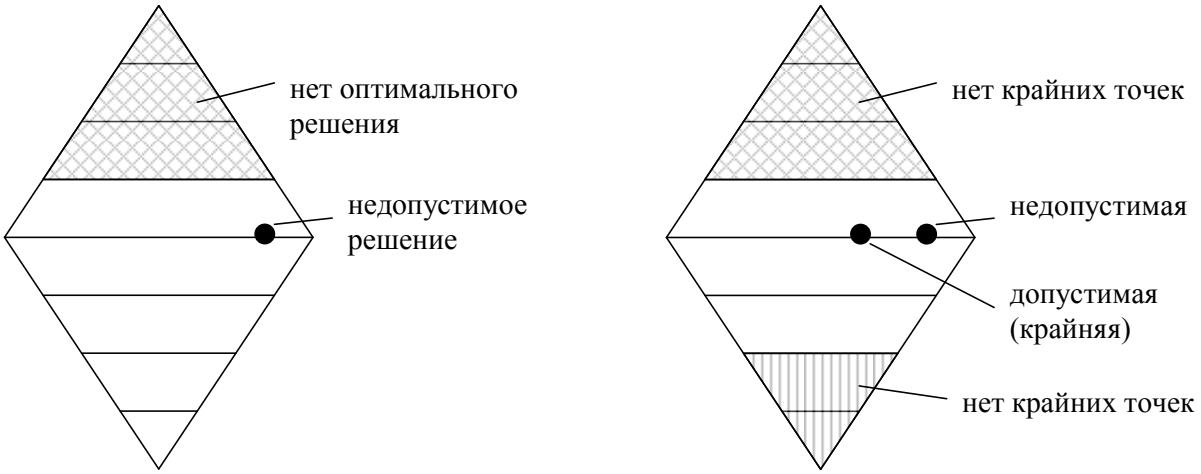



Рис. 5. Иллюстрация свойства 7

*Свойство 8.* Из леммы 6 следует, что если функция $C(X)$ унимодальна и решение, дающее наибольшее значение функции $C(X)$ на уровне $O_k(X^0)$, является допустимым, то на уровне $O_l(X^0)$, где $l < k$, нет оптимального решения (рис. 6).

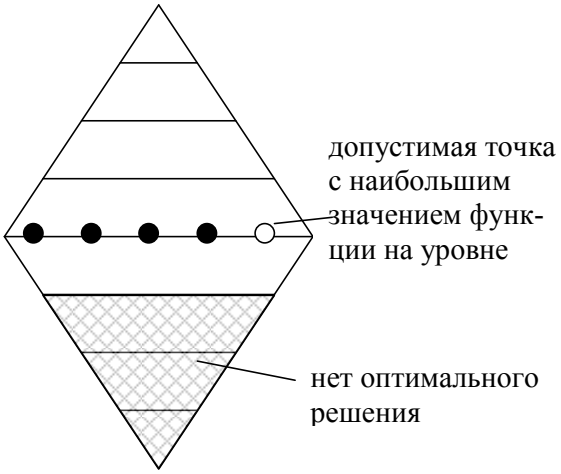



Рис. 6. Иллюстрация свойства 8

*Монотонная целевая функция* возрастает от точки $X^0 \in B_2^n$.

Согласно теореме 1 оптимальное решение принадлежит подмножеству крайних точек.

*Свойство 9.* Из свойства 3 следует, что если функция $C(X)$ монотонна и решение $Y \in B_2^n$ является допустимым (удовлетворяет ограничению $A(Y) \le H$), то в подкубе $K(X^0, Y)$ нет оптимального решения (рис. 7).

*Структурно монотонная целевая функция* возрастает от точки $X^0 \in B_2^n$.

*Свойство 10.* Из свойства 4 следует, что если функция $C(X)$ монотонна и решение $Y \in O_k(X^0)$ является допустимым (удовлетворяет ограничению $A(Y) \le H$), то на уровне $O_l(X^0)$, где $l < k$, нет оптимального решения (рис. 8).

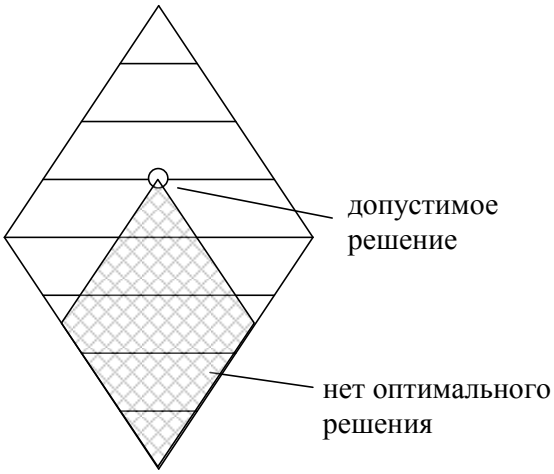



Рис. 7. Иллюстрация свойства 9

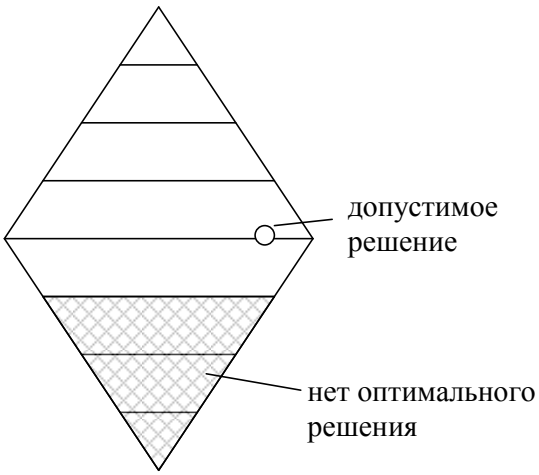



Рис. 8. Иллюстрация свойства 10

Описанные свойства являются основой для построения регулярных алгоритмов поиска точных решений задач условной псевдобулевой оптимизации.

Свойство монотонности довольно часто встречается у псевдобулевых функций в практических задачах оптимизации. Как видно из описанных выше результатов исследования свойств псевдобулевых функций, наличие свойства монотонности дает возможность значительно сократить перебор при поиске оптимального решения и построить эффективные алгоритмы оптимизации.

Рассмотрим построение алгоритма оптимизации для случая, когда целевая функция $C(X)$ и функция ограничения $A(X)$ монотонно возрастают от $X^0 \in B_2^n$ [105]. Оптимальное решение принадлежит подмножеству крайних точек множества допустимых решений. Если решение $Y \in B_2^n$ является крайней точкой, то в подкубах $K(X^0, Y)$ и $K(Y, X^1)$ крайних точек нет, и их можно исключить из рассмотрения при поиске остальных крайних точек (рис. 9).

С применением этих свойств был построен описанный ниже регулярный алгоритм нахождения точного решения поставленной задачи.

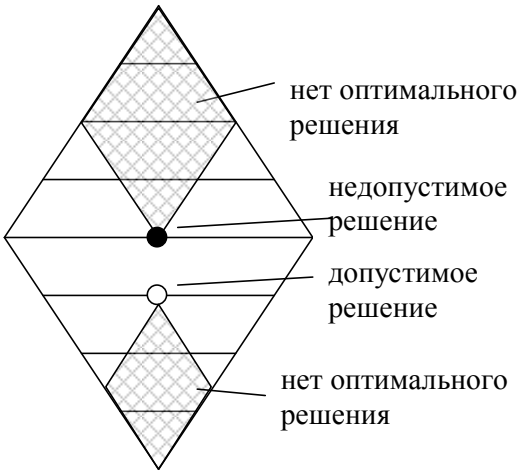



Рис. 9. Исключаемые подкубы для случая монотонных функций

На первом этапе поиска необходимо найти какую-либо одну граничную точку. Алгоритм начинает работу из точки $X^0$ (стартовая точка). Если эта точка не удовлетворяет ограничению, то задача не имеет решения. Берется любая допустимая точка $X_1 \in O_1(X^0)$ и принимается за стартовую. Если среди точек, соседних к $X^0$, нет допустимых, то решением задачи является $X^0$. Далее берется любая допустимая точка $X_2 \in O_1(X_1) \cap O_2(X^0)$. Если среди точек подмножества $O_1(X_k) \cap O_{k+1}(X^0)$, где $X_k \in O_k(X^0)$, нет допустимых, то $X_k$ является первой найденной граничной точкой. $Y_1 = X_k$.

Все точки подкубов $K(X^0, Y_1)$ и $K(Y_1, X^1)$ исключаются из дальнейшего рассмотрения.

На следующем этапе поиска берется точка $X \in O_k(X^0) \setminus Y_1$. Если эта точка не удовлетворяет ограничению, то подкуб $K(X, X^1)$ исключается, и рассматривается точка из подмножества $(O_1(X) \cap O_{k-1}(X^0)) \setminus K(X^0, Y_1)$. В противном случае, если точка $X$ допустима, и допустима хотя бы одна точка из подмножества $(O_1(X) \cap O_{k+1}(X^0)) \setminus K(Y_1, X^1)$, то алгоритм переходит к этой новой точке. Если же $X$ допустима, но ни одна из точек $O_1(X) \cap O_{k+1}(X^0)$ не выполняет ограничение, то $X$ является граничной точкой, $Y_2 = X$.

Далее процедура повторяется.

Если после нахождения $Y_s$ подмножество $O_{k_s}(X^0) \setminus (K(X^0, Y_1) \cup \ldots \cup K(X^0, Y_s) \cup K(Y_1, X^1) \cup \ldots \cup K(Y_s, X^1))$ пусто, то алгоритм прекращает поиск граничных точек.

До данного момента алгоритм вычислял значения лишь функции $A(X)$ в рассматриваемых точках и сравнивал его с величиной $H$.

После того как найдены граничные точки, в них вычисляются значения функции $C(X)$, и точка с наибольшим значением целевой функции принимается за оптимальное решение задачи условной оптимизации.

*Алгоритм 1.*

1. Полагаем $k=1$, $\Omega=\varnothing$, $s=0$, $X_0=X^0$. Если $A(X^0)>H$, то задача не имеет допустимого решения.
2. Выбираем $X_{k+1}\in(O_1(X_k)\cap O_{k+1}(X^0))\setminus\Omega$, для которого $A(X_{k+1})\le H$. Если для какого-либо $X\in O_1(X_k)\cap O_{k+1}(X^0)$ не выполняется $A(X)\le H$, то $\Omega=\Omega\cup K(X,X^1)$.
3. Если такой $X_{k+1}$ существует, то $k=k+1$ и возвращаемся к п. 2.
4. Принимаем $s=s+1$, $Y_s=X_k$, $\Omega=\Omega\cup K(X^0,Y_s)\cup K(Y_s,X^1)$.
5. Выбираем $X\in(O_k(X^0)\cap O_{2m}(Y_s))\setminus\Omega$ таким образом, чтобы $m$ было наибольшим, $1\le m\le\min\{k,n-k\}$. Если таких точек нет, то переходим к п. 11.
6. Если $A(X)>H$, то $\Omega=\Omega\cup K(X,X^1)$ и выбираем $X'\in(O_1(X)\cap O_{k-1}(X^0))\setminus\Omega$, иначе переходим к п. 8.
7. Принимаем $X=X'$, $k=k-1$. Если $A(X)>H$, то возвращаемся к п. 6.
8. Если $A(X)\le H$, то выбираем $X'\in(O_1(X)\cap O_{k+1}(X^0))\setminus\Omega$, для которого $A(X)\le H$. Если таких точек нет, то переходим к п. 10.
9. Принимаем $X=X'$, $k=k+1$ и возвращаемся к п.8.
10. Принимаем $s=s+1$, $Y_s=X$, $\Omega=\Omega\cup K(X^0,Y_s)\cup K(Y_s,X^1)$ и переходим к п. 5.
11. Определяем оптимальное решение $X^*$ из условия $C(X^*)=\max\limits_{i=\overline{1,s}}C(Y_i)$.

<u>*Теорема 3*</u>. Нахождение решения задачи условной псевдобулевой оптимизации с целевой функцией и ограничением, монотонно возрастающими от точки $X^0\in B_2^n$, в случае, когда все крайние точки $Y_s$ принадлежат $O_k(X^0)$, $s=\overline{1,C_n^k}$, требует просмотра $T^k$ точек $B_2^n$,

$$T^k=k+C_n^k+C_n^{k+1}.$$

<u>*Следствие 6*</u>. Оценка сверху трудоемкости алгоритма 1

$$T_3\le\max_{0\le k<n}T^k=T^{\left[\frac{n}{2}\right]}=\left[\frac{n}{2}\right]+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]+1}.$$

<u>*Теорема 4*</u>. Для определения точного решения задачи условной псевдобулевой оптимизации с целевой функцией и ограничением, монотонно возрастающими от точки $X^0\in B_2^n$, в худшем случае (при максимально возможном количестве крайних точек) требуется просмотреть не менее $C_n^{[n/2]}+C_n^{[n/2]+1}$ точек $B_2^n$.

*Замечание 5*. В соответствии со следствием 6 и теоремой 4 алгоритм 3 решения задачи условной псевдобулевой оптимизации с монотонными функциями является существенно не улучшаемым.

Оценки трудоемкости сверху разработанных точных алгоритмов псевдобулевой оптимизации для задач с целевыми функциями и функциями ограничений, обладающих определенными конструктивными свойствами, обобщены в таблице 1 (при условии структурной монотонности функций ограничений) [106]

Таблица 1 – Оценки трудоемкости сверху регулярных алгоритмов оптимизации, предназначенных для различных классов задач

| *C(X)* \ *A(X)* | монотонная | немонотонная унимодальная | полимодальная |
|---|---|---|---|
| монотонная | $\left[\frac{n}{2}\right]+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]+1}$ | $C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]-1}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]+1}$ | $2^n$ |
| немонотонная унимодальная | $C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]-1}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]+1}$ | $\left[\frac{n}{2}\right]+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]-1}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]}+C_n^{\left[\frac{n}{2}\right]+1}$ | $2^n$ |
| полимодальная | $2^n$ | $2^n$ | $2^n$ |

Рассмотрим случай, когда система ограничений состоит из нескольких неравенств:

$$\begin{cases} C(X)\to\max\limits_{X\in B_2^n}, \\ A_j(X)\le H_j,\ j=\overline{1,m}. \end{cases}$$

Введем характеристическую функцию системы неравенств

$$\Phi(X)=\begin{cases} 0, A_j(X)\le H_j, \forall j=\overline{1,m}, \\ 1, \text{в противном случае}. \end{cases}$$

При $\Phi(X)=0$ решение $X$ удовлетворяет системе ограничений, а при $\Phi(X)=1$ решение $X$ не выполняет хотя бы одно неравенство.

*Теорема 5.* Если все функции $A_j(X)$ системы ограничений являются монотонно возрастающими от точки $X^0$, то и функция $\Phi(X)$ является монотонной.

Таким образом, вместо системы неравенств можно использовать неравенство $\Phi(X)\le 0$ и решать задачу соответствующим алгоритмом.

Итак, рассмотрены различные классы задач условной псевдобулевой оптимизации и соответствующие алгоритмы. Оценивая эффективность регулярных алгоритмов в целом, можно заключить, что они гарантируют точное решение задачи условной оптимизации практически любых псевдобулевых функций с различными типами ограничений при средней трудоемкости меньшей, чем трудоемкость полного перебора. Алгоритм 1 в наибольшей мере учитывает свойства класса задач условной оптимизации, в которых целевая функция и ограничение представляют собой монотонные унимодальные псевдобулевые функции, и, таким образом, реализует информационную сложность данного класса задач и является неулучшаемым в этом смысле.

Для применения регулярных алгоритмов необходимо предварительно соотнести задачу с одним из выделенных классов. Если нет никаких априорных сведений о свойствах псевдобулевых функций, заданных алгоритмически, необходимо провести процедуру идентификации свойств функций.

## Приближенные алгоритмы условной псевдобулевой оптимизации

Теория алгоритмов указывает на то, что всякий алгоритм должен обладать свойством однозначности, т. е. при одинаковых исходных данных результат его работы должен быть одинаковым. Случайный поиск расширяет понятие алгоритма, допуская тем самым неоднозначность результата при одинаковых исходных данных.

Естественно подразделить все возможные алгоритмы поиска на два класса:

- детерминированные, регулярные алгоритмы поиска, обладающие указанным свойством однозначности;
- недетерминированные (случайные, стохастические, вероятностные и т.д.) алгоритмы поиска, не обладающие свойством однозначности, результат работы которых имеет статистический характер.

В работе [76] показано, что при решении дискретных задач оптимизации очень естественно использовать метод случайного поиска. Это связано с тем, что всякого рода градиентные представления, свойственные детерминированным методам, в дискретном случае теряют смысл.

Случайный поиск как метод решения условной задачи отличается рядом преимуществ по сравнению с детерминированными методами. Здесь у случайного поиска имеется ряд возможностей, связанных со случайным характером поиска, которых в принципе не может иметь ни один детерминированный метод решения задачи.

Одними из наиболее эффективных алгоритмов случайного поиска для задач безусловной псевдобулевой оптимизации (а также для задач условной оптимизации специального вида) являются алгоритмы метода изменяющихся вероятностей [6]. Однако для данной задачи эти алгоритмы не учитывают в полной мере специфику решаемой задачи.

Так как в условной задаче оптимальное решение находится среди граничных точек множества допустимых решений, то алгоритм оптимизации должен быть направлен на поиск именно граничных точек [107].

Рассмотрим задачу оптимизации монотонно возрастающей от точки $X^0$ псевдобулевой функции при произвольном ограничении. Оптимальное решение в этом случае, как показано выше, принадлежит подмножеству крайних точек множества допустимых решений.

Простейший алгоритм случайного поиска крайних точек состоит в следующем [108]. Поиск начинается из $X^0$. На каждом шаге алгоритм выбирает соседнюю точку на следующем уровне, двигаясь, таким образом, по пути возрастания целевой функции до границы допустимой области. При необходимости процедура повторяется несколько раз, и из найденных крайних точек выбирается лучшая.

Рассмотренные выше два алгоритма на каждом шаге случайно выбирают допустимую точку на следующем уровне (если такая существует). Таким образом, при поиске граничных точек эти алгоритмы не учитывают значения целевой функции $C(X)$ и функции $A(X)$, кроме как для определения, удовлетворяет ли точка ограничению, и используют значения целевой функции лишь при сравнении найденных граничных точек (последний пункт алгоритма).

Альтернативой случайному поиску граничных точек является регулярный алгоритм, использующий гриди эвристику [109].

Гриди алгоритмы являются интуитивными эвристиками, в которых на каждом шаге принимается решение, являющееся наиболее выгодным в данный момент, без учета того, что происходит на последующих шагах поиска [110].

Описанные выше и исследуемые далее схемы приближенных алгоритмов поиска граничных точек можно агрегировать в общую схему [111]. Для любой эвристики поиска граничных точек будем рассматривать пару алгоритмов – прямой и двойственный. Прямой алгоритм начинает поиск из допустимой области и движется по пути возрастания целевой функции, пока не найдет крайнюю точку допустимой области. Напротив, двойственный алгоритм ведет поиск в недопустимой области по пути убывания целевой функции, пока не найдет некоторого допустимого решения.

*Общая схема прямого алгоритма поиска*

1. Полагаем $X_1 = X^0$, $i = 1$.
2. В соответствии с правилом выбираем $X_{i+1} \in O_i(X^0) \cap O_1(X_i) \cap S$. Если таких точек нет, то переходим к п. 3; иначе $i = i + 1$ и повторяем шаг.
3. Принимаем $X_{opt} = X_{i+1}$.

*Общая схема двойственного алгоритма поиска*

1. Полагаем $X_1 \in O_n(X^0)$, $i = 1$.
2. В соответствии с правилом выбираем $X_{i+1} \in O_{n-i}(X^0) \cap O_1(X_i)$. Если $X_{i+1} \in S$, то переходим к п. 3; иначе $i = i + 1$ и повторяем шаг.
3. Принимаем $X_{opt} = X_{i+1}$.

Как видно из приведенных схем, прямой алгоритм находит крайнюю точку допустимой области, в то время как двойственный алгоритм находит граничную точку, которая может и не являться крайней. Поэтому для задач со связной областью допустимых решений прямой алгоритм в среднем находит лучшее решение, чем двойственный. Если же мы применим прямой алгоритм для задачи с несвязной допустимой областью, то полученное в результате решение может быть далеким от оптимального, так как на пути возрастания целевой функции допустимые и недопустимые решения будут чередоваться. Для таких случаев более пригоден двойственный алгоритм, для которого это чередование не играет никакой роли. Для улучшения решения, полученного двойственным алгоритмом, рекомендуется применять соответствующий прямой алгоритм. Такое улучшение на практике оказывается весьма значительным [112].

Рассматриваемые здесь алгоритмы поиска граничных точек отличаются друг от друга лишь правилом выбора следующей точки на шаге 2 общих схем.

*Правило 1*. Случайный поиск граничных точек (СПГ)

Точка $X_{i+1}$ выбирается случайным образом. Каждая точка на следующем шаге может быть выбрана с равной вероятностью. При решении практических задач эти вероятности могут быть не равными, а вычисляться на основании специфики задачи до начала поиска.

*Правило 2*. Гриди алгоритм

Точка $X_{i+1}$ выбирается из условия

$$\lambda(X_{i+1}) = \max_j \lambda(X^j),$$

где $X^j \in O_i(X^0) \cap O_1(X_i) \cap S$ для прямого алгоритма и $X^j \in O_{n-i}(X^0) \cap O_1(X_i)$ для двойственного.

Функция $\lambda(X)$ выбирается исходя из специфики задачи, например:
целевая функция $\lambda(X) = C(X)$,
удельная ценность $\lambda(X) = C(X)/A(X)$ (для одного ограничения) и т.д.

*Правило 3*. Адаптивный случайный поиск граничных точек (АСПГ)

Точка $X_{i+1}$ выбирается случайным образом в соответствии с вектором вероятностей

$$P^i = (p_1^i, p_2^i, \ldots, p_J^i),$$

где $J$ – количество точек, из которых производится выбор.

$$p_j^i = \frac{\lambda(X^j)}{\sum_{l=1}^{J} \lambda(X^l)}, \quad j = \overline{1, J},$$

где $X^j \in O_i(X^0) \cap O_1(X_i) \cap S$ для прямого алгоритма и $X^j \in O_{n-i}(X^0) \cap O_1(X_i)$ для двойственного.

*Правило 4*. Модифицированный случайный поиск граничных точек (МСПГ).

Точка $X_{i+1}$ выбирается из условия

$$\lambda(X_{i+1}) = \max_r \lambda(X^r),$$

где $X^r$ – точки, выбранные по правилу 1, $r = \overline{1, R}$; $R$ – задаваемый параметр алгоритма.

Приведенные выше регулярные и стохастические алгоритмы переводят исходную задачу условной псевдобулевой оптимизации, являющуюся *NP*-трудной, в задачу

$$\frac{f(X^*) - f(X')}{f(X^*)} \le \varepsilon,$$

принадлежащую классу *P* (полиномиально разрешима), где $X^*$ – оптимальное решение, $X'$ – приближенное решение.

Разработанные приближенные алгоритмы (гриди алгоритмы и алгоритмы случайного поиска граничных точек) имеют полиномиальные оценки трудоемкости и поэтому предназначены, прежде всего, для решения задач большой размерности. Наиболее эффективной представляется следующая схема. На первом этапе задача решается гриди алгоритмом, а затем находятся несколько решений с помощью адаптивного случайного поиска; лучшее из найденных принимается за решение задачи.

## Выводы

В процессе управления сложными техническими и организационными системами часто возникает необходимость оптимизации по определенным критериям посредством выбора наилучших значений управляемых переменных из области допустимых значений, определяемой рядом ограничений на переменные. Причем эти критерии и ограничения во многих встречающихся на практике случаях не удается записать в виде явных алгебраических выражений, т.е. они заданы алгоритмически, а упрощения моделей, такие как линеаризация, оказываются неприемлемыми для оптимизации при управлении сложными техническими системами. Это делает невозможным применение хорошо изученных методов математического программирования и соответствующих программных приложений.

Следует отметить, что известные поисковые методы не учитывают особенности ограничений, да и целевых функций, наблюдаемые, как правило, в реальных задачах. Адаптивные поисковые алгоритмы типа генетических, к тому же, требуют подбора некоторого числа параметров, что возможно только при предварительном решении ряда однотипных задач и неприемлемо при единичном решении задачи, и не дают никакой гарантии об исключении полного перебора.

Значительную часть в задачах дискретной оптимизации занимают задачи оптимизации с булевыми переменными. Строгая булевость – свойство, которое

часто встречается в практических задачах оптимизации. Задачам оптимизации с булевыми переменными, как с алгоритмическим, так и с алгебраическим заданием функций, многие исследователи уделяют особое внимание. В принципе, любая задача дискретной оптимизации сводится к псевдобулевой.

Проблема повышения эффективности решения задач условной псевдобулевой оптимизации с алгоритмически заданными функциями является весьма актуальной. Наибольшая эффективность может быть достигнута путем выявления топологических свойств пространства булевых переменных и свойств псевдобулевых функций и их утилизации при построении математического аппарата решения выделенных классов задач.

Разработанные алгоритмы оптимизации применимы для любых задач условной псевдобулевой оптимизации, возникающих в процессе управления сложными техническими объектами, а также в областях экономики. Наиболее интересными для практического использования являются точные поисковые алгоритмы, реализующие свойства классов задач, и приближенные алгоритмы, особенно алгоритм адаптивного случайного поиска граничных точек, а также процедура идентификации свойств псевдобулевых функций.

Описанные алгоритмы использованы в решении задачи оптимизации загрузки технологического оборудования предприятия, представляющей собой задачу условной псевдобулевой оптимизации с несвязным множеством допустимых решений [113].

Интересны результаты применения разработанных алгоритмов оптимизации в методах распознавания, в частности, в логических алгоритмах классификации [114]. Применение эффективных алгоритмов комбинаторной оптимизации позволяет находить информативные закономерности в данных, что ведет к получению эффективных решающих правил.

## Литература

1. Crama Y., Hammer P. L. Boolean Functions: Theory, Algorithms, and Applications. New York: Cambridge University Press. – 2011. – 687 p.

2. Казаковцев Л. А. Подходы к автоматизации задач планирования ассортимента на торговых предприятиях // Вестник НИИ Систем управления, волновых процессов и технологий. 2000. Вып. 5.

3. Имануилов П. А., Пуртиков В. А. Решение задачи формирования кредитного портфеля банка методом Мивер // Вестник НИИ Систем управления, волновых процессов и технологий. 2000. Вып. 5.

4. Ashrafi N., Berman O., Cutler M. Optimal Design of Large Software Systems Using N-Version Programming // In IEEE Transactions on Reliability. 1994. Vol. 43. No. 2. Pp. 344-350.

5. Avizienis A. The methodology of N-version programming // Software fault tolerance. 1995. Vol. 5. Pp. 23-47.

6. Антамошкин А. Н. Оптимизация функционалов с булевыми переменными. – Томск: Изд-во Томского ун-та. – 1987. – 218 с.

7. Масич И. С. Метод ветвей и границ в задаче оптимизации систем отказоустойчивого программного обеспечения // Научная сессия ТУСУР.

Материалы докладов межрегиональной научно-технической конференции. – Томск, 2002. – С. 31-34.

8. Masich I. S. Multi-version methods of software reliability growth in intelligence systems. Intelligent Systems // Proceeding of the Fifth International Symposium. – Moscow: BMSTU. – 2002. – Pp. 74-76.

9. Системный анализ: проектирование, оптимизация и приложения / под общей редакцией А. Н. Антамошкина. – Красноярск: САА и СО РИА, 1996. – Т.1. – 334 с.; Т.2. – 290 с.

10. Юдин Д. Б., Горяшко А. П., Немировский А. С. Математические методы оптимизации устройств и алгоритмов АСУ. – М.: Радио и связь. – 1982. – 288 с.

11. Barahona F., Grotschel M., Junger M., Reinelt G. An application of combinatorial optimization to statistical physics and circuit layout design // Operation Research. 1988. No. 36. Pp. 493-513.

12. System Analysis, Design and Optimization. An Introduction / General Editing by A. Žilinskas. – Krasnoyarsk, 1993. – 203 p.

13. Масич И. С. Поисковые алгоритмы псевдобулевой оптимизации в задачах диагностики и прогнозирования // Высокие технологии, исследования, промышленность. Сборник трудов 9 Международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Том 3. – Санкт-Петербург, 2010. – С. 89-90.

14. Karp R. M., Miller R. G., Thatcher J. W. Reducibility among combinatorial problems. Journal of Symbolic Logic. 1975. No. 40 (4). Pp. 618-619.

15. Ranyard R. H. An algorithm for maximum likelihood ranking and Slater's i from paired comparisions // British Journal of Mathematical and Statistical Psychology. 1976. No. 29. Pp. 242-248.

16. Rao M. R. Cluster analysis and mathematical programming // Journal of the American Statistical Association. 1971. Vol. 66. Pp. 622-626.

17. Масич И. С. Поисковые алгоритмы комбинаторной оптимизации в задачах классификации данных // Высокие технологии, образование, промышленность. Т. 3: сборник статей XI Международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – Санкт-Петербург, 2011. – С. 91-92.

18. Hammer P. L., Shliffer E. Applications of pseudo-Boolean methods to economic problems // Theory and decision. 1971. No. 1. Pp. 296-308.

19. Масич И. С., Краева Е. М. Логические алгоритмы классификации в задачах управления сельскохозяйственной деятельностью // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы VI международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2013. – С. 123-125.

20. Hillier F. S. The evaluation of risky interrelated investments. – Amsterdam: North-Holland Publishing, 1969. – 113 p.

21. Laughhunn D. J. Quadratic binary programming with applications to capital budgeting problems // Operations Research. 1970. No. 18. Pp. 454-461.

22. Laughhunn D. J., Peterson D. E. Computational experience with capital expenditure programming models under risk // Business Finance. 1971. No. 3. Pp. 43-48.

23. Масич И. С. Комбинаторные алгоритмы оптимизации в задаче распределения земли при производстве полевых культур // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы VI международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2013. – С. 125-126.

24. Масич И. С., Краева Е. М. Логический анализ данных и алгоритмы распознавания в задачах управления сельскохозяйственной деятельностью // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2013, С. 301-303.

25. Weingartner H. M. Capital budgeting of interrelated projects: survey and synthesis // Management Science. 1966. No. 12. Pp. 485-516.

26. Масич И. С. Модель и алгоритмы оптимизации для задачи распределения земли при производстве полевых культур // Наука и образование: опыт, проблемы, перспективы развития: материалы международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2013. – С. 303-304.

27. Hammer P. L. Pseudo-Boolean remarks on balanced graphs // International Series of Numerical Mathematics. 1977. No. 36. Pp. 69-78.

28. Ebenegger Ch., Hammer P. L., de Werra D. Pseudo-Boolean functions and stability of graphs // Annals of Discrete Mathematics. 1984. No. 19. Pp. 83-97.

29. Масич И. С. Алгоритмы комбинаторной оптимизации для планирования загрузки литейного производства // Материалы VII Международной научно-практической конференции «Татищевские чтения: актуальные проблемы науки и практики». – Тольятти, 2010. – С.3-10.

30. Crama Y. Combinatorial optimization models for production scheduling in automated manufacturing systems // European Journal of Operational Research. 1997. No. 99. Pp. 136-153.

31. Антамошкин А. Н., Дегтерев Д. А., Масич И. С. Регулярный алгоритм оптимизации загрузки оборудования // Труды конф. «Информационные недра Кузбасса». – Кемерово: КемГУ. – 2003. – С. 59-61.

32. Bilbao J. M. Cooperative Games on Combinatorial Structures. – Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers. – 2000.

33. Hammer P. L., Holzman R. Approximations of pseudo-Boolean functions: Applications to game theory // Methods and Models of Operations Research. 1992. No. 36. Pp. 3-21.

34. Crama Y., Hammer P. L. Bimatroidal independence systems // Mathematical Methods of Operations Research. 1989. Vol. 33. No. 3. Pp. 149-165.

35. Welsh D. J. A. Matroid theory. – London: Academic Press. – 1976.

36. Fraenkel A. S., Hammer P. L. Pseudo-Boolean functions and their graphs // Annals of Discrete Mathematics. 1984. No. 20. Pp. 137-146.

37. Hammer P. L., Hansen P., Simeone B. Upper planes of quadratic 0-1 functions and stability in graphs // Nonlinear Programming. N. 4. 1981. P. 395-414.

38. Nieminen J. A linear pseudo-Boolean viewpoint on matching and other central concepts in graph theory // Zastosowania Matematyki. 1974. No. 14. – Pp. 365-369.

39. Масич И. С. Отбор существенных факторов в виде задачи псевдобулевой оптимизации // Решетневские чтения: Тез. докл. VII Всерос. науч. конф. – Красноярск: СибГАУ. – 2003. – С. 234-235.

40. Масич И. С. Локальная оптимизация для задачи выбора информативных факторов // Наука. Технологии. Инновации. Материалы докладов всероссийской научной конференции. Часть 1. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – С. 50-51.

41. Масич И. С. Повышение качества распознавания логических алгоритмов классификации путем отбора информативных закономерностей // Информационные системы и технологии: Материалы Международной научно-технической конференции. – Красноярск: Изд. Научно-инновационный центр, 2012. – С. 149-153.

42. Масич И. С. Задачи оптимизации и их свойства в логических алгоритмах распознавания // Проблемы оптимизации и экономические приложения: материалы V Всероссийской конференции. – Омск: Изд-во Ом. гос. ун-та, 2012.

43. Масич И. С. Комбинаторная оптимизация и логические алгоритмы классификации в задаче прогнозирования осложнений инфаркта миокарда // Инновационные тенденции развития российской науки: материалы III Международной научно-практической конференции. – Красноярск, 2010. – С. 276-280.

44. Hammer P. L., Rudeanu S. Boolean Methods in Operations Research and Related Areas. – Berlin: Springer-Verlag; New York: Heidelberg. – 1968. – 310 p.

45. Boros E., Hammer P. L. Pseudo-Boolean Optimization // Discrete Applied Mathematics. – 2002. – No. 123(1-3). Pp. 155-225.

46. Береснев В. Л., Агеев А. А. Алгоритмы минимизации для некоторых классов полиномов от булевых переменных // Модели и методы оптимизации: Сб. науч. тр. Том 10. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 5-17.

47. Гришухин В. П. Полиномиальность в простейшей задаче размещения // Препринт ЦЭМИ АН СССР. – М., 1987. – 64 с.

48. Ковалев М. М. Дискретная оптимизация (целочисленное программирование). – Минск: Изд-во БГУ, 1977. – 191 с.

49. Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю. Дискретное программирование – М. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1969. – 389 с.

50. Allemand K., Fukuda K., Liebling T. M., Steiner E. A polynomial case of unconstrained zero-one quadratic optimization // Mathematical Programming. Ser. A. 2001. No. 91. Pp. 49-52.

51. Barth P. A Davis-Putnam Based Enumeration Algorithm for Linear Pseudo-Boolean Optimization // Technical Report MPI-I-95-2-003. – Saarbrücken: Max-Planck-Institut für Informatik. – 1995. – 19 p.

52. Crama Y. Recognition problems for special classes of polynomials in 0-1 variables // Mathematical Programming. 1989. No. 44. Pp. 139-155.

53. Crama Y., Hansen P., Jaumard B. The basic algorithm for pseudo-Boolean programming revisited // Discrete Applied Mathematics. 1990. No. 29. Pp. 171-185.

54. Werra D. De, Hammer P. L., Liebling T., Simeone B. From linear separability to unimodality: A hierarchy of pseudo-Boolean functions // SIAM Journal on Discrete Mathematics. 1998. No. 1. Pp. 174-184.

55. Hammer P. L., Hansen P., Pardalos P. M., Rader D. J. Maximizing the product of two linear functions in 0-1 variables // Research Report 2-1997. – Piscataway, NJ: Rutgers University Center for Operations Research. – 1997.

56. Hammer P. L., Peled U. N. On the Maximization of a Pseudo-Boolean Function // Journal of the Association for Computing Machinery. 1972. Vol. 19, No. 2. Pp. 265-282.

57. Hansen P., Jaumard B., Mathon V. Constrained nonlinear 0-1 programming // Journal on Computing. 1993. No. 5. Pp. 97-119.

58. Martello S., Toth P. The 0-1 Knapsack Problem. // Combinatorial Optimization. 1979. Pp. 237-279.

59. Padberg M. W. A Note on zero-one programming // Operations Research. 1975. No. 23. Pp. 833-837.

60. Padberg M. W. Covering, Packing and Knapsack Problems // Annals of Discrete Mathematics. 1979. No. 4. Pp. 265-287.

61. Wegener I., Witt C. On the Optimization of Monotone Polynomials by Simple Randomized Search Heuristics // Procs. of GECCO 2003. – 2003. – Pp. 622-633.

62. Adams W. P., Sherali H. D. A tight linearization and an algorithm for zero-one quadratic programming problems // Management Science. 1986. Vol. 32. No. 10. Pp. 1274-1290.

63. Boros E., Hammer P. L. A max-flow approach to improved roof duality in quadratic 0-1 minimization // Research Report RRR 15-1989, Piscataway, NJ: Rutgers University Center for Operations Research. – 1989.

64. Glover F., Woolsey R. E. Further reduction of zeroone polynomial programs to zero-one linear programming problems // Operations Research. 1973. No. 21. Pp. 156-161.

65. Hansen P., Lu S. H., Simeone B. On the equivalence of paved duality and standard linearization in nonlinear 0-1 optimization // Discrete Applied Mathematics. 1990. No. 29. Pp. 187-193.

66. Watters L. G. Reduction of integer polynomial problems to zero-one linear programming problems // Operations Research. 1967. No. 15. Pp. 1171-1174.

67. Boros E., Crama Y., Hammer P. L. Chvátal cuts and odd cycle inequalities in quadratic 0-1 optimization // SIAM Journal on Discrete Mathematics. 1992. No. 5. Pp. 163-177.

68. Boros E., Crama Y., Hammer P. L. Upper bounds for quadratic 0-1 maximization // Operation Research Letters. 1990. No. 9. Pp. 73-79.

69. Boros E., Hammer P. L. A max-flow approach to improved roof duality in quadratic 0-1 minimization // Research Report RRR 15-1989, Piscataway, NJ: Rutgers University Center for Operations Research. – 1989.

70. Boros E., Hammer P. L. Cut-Polytopes, Boolean quadratic polytopes and nonnegative quadratic pseudo-Boolean functions // Mathematics of Operations Research. 1993. No. 18. Pp. 245-253.

71. Hammer P. L., Hansen P., Simeone B. Roof duality, complementation and persistency in quadratic 0-1 optimization // Mathematical Programming. 1984. No. 28. Pp. 121-155.

72. Hammer P. L., Simeone B. Quadratic functions of binary variables // Combinatorial Optimization: Lecture Notes in Mathematics. Vol. 1403– Berlin: Springer-Verlag; New York: Heidelberg. – 1989.

73. Papadimitriou C. H., Steiglitz K. Combinatorial Optimization. – New York: Dover Publications. – 1998.

74. Масич И. С. Поисковые алгоритмы условной псевдобулевой оптимизации: монография. – Красноярск: СибГАУ. 2013. – 160 с.

75. Гринченко С. Н. Метод «проб и ошибок» и поисковая оптимизация: анализ, классификация, трактовка понятия «естественный отбор» // Исследовано в России. 2003. № 104. С. 1228-1271.

76. Растригин Л. А. Адаптация сложных систем – Рига: Зинатне. 1981. – 375 с.

77. Гринченко С. Н. Иерархическая оптимизация в природных и социальных системах: селекция вариантов приспособительного поведения и эволюции систем "достаточно высокой сложности" на основе адаптивных алгоритмов случайного поиска // Исследовано в России. 2000. № 108. С. 1421-1440.

78. Гринченко С. Н. Случайный поиск, адаптация и эволюция: от моделей биосистем - к языку представления о мире (части 1 и 2) // Исследовано в России. – 1999. – № 10 и № 11.

79. Goldberg D. E. Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. – Boston: Addison-Wesley. – 1989.

80. Schwefel H. P. Evolution and Optimum Seeking. No.Y.: Whiley. – 1995. – 612 p.

81. Björklund H., Petersson V., Vorobjov S. Experiments with Iterative Improvement Algorithms on Completely Unimodal Hypercubes // Technical report 2001-017. – Uppsala, Sweden: Uppsala University – 2001. – 30 p.

82. Björklund H., Sandberg S., Vorobjov S. Optimization on Completely Unimodal Hypercubes // Technical report 2002-018. – Uppsala, Sweden: Uppsala University – 2002. – 39 p.

83. Masich I. S. Heuristic algorithms for searching boundary points in pseudo-Boolean optimization problems // Materiály IX mezinárodní vědecko - praktická konference «Efektivní nástroje moderních věd – 2013». - Díl 40. Matematika: Praha. Publishing House «Education and Science». – Pp. 54-57.

84. Masich I.S. Random and greedy search algorithms for conditional pseudo-Boolean optimization // Материали за 9-а международна научна практична конференция, «Новината за напреднали наука». Том 53. Математика. – София: «Бял ГРАД-БГ». 2013. – Pp. 49-51.

85. Антамошкин А. Н. Регулярная оптимизация псевдобулевых функций. – Красноярск: Изд-во Красноярского ун-та. – 1989. – 284 с.

86. Антамошкин А. Н., Рассохин В. С. Оптимизация полимодальных псевдобулевых функций // ОФАП Минвуза РСФСР. Инв. № 85119. М., 1985. – 43 с.

87. Antamoshkin A. Regular optimization of pseudoboolean functions // System Modelling and Optimization. – Budapest. – 1985. – Pp. 17-18.

88. Масич И. С. Регулярный алгоритм поиска граничных точек в задаче условной оптимизации монотонных псевдобулевых функций // «Совершенствование технологий поиска и разведки, добычи и переработки полезных ископаемых»: Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Красноярск: КрасГАЦиЗ. – 2003. – С. 170-172.

89. Масич И. С. Решение задач условной псевдобулевой оптимизации посредством обобщенных штрафных функций // Вестник молодых ученых. 2004. № 4. 2004. С. 63-69.

90. Масич И. С. Приближенные алгоритмы поиска граничных точек для задачи условной псевдобулевой оптимизации // Вестник СибГАУ. 2006. № 1(8). С. 39-43.

91. Garey M. R., Johnson D. S. Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-completeness. – San Francisco: W. H. Freeman and Company. – 1979.

92. Kreinovich V., Lakeyev A., Rohn J., Kahl P. Computational Complexity and Feasibility of Data Processing and Interval Computations // Norwell, Massachusetts: Kluwer Academic Publishers. – 1998. – 460 p.

93. Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. Computational Complexity of Discrete Optimization Problems // Annals of Discrete Mathematics. 1979. No. 4. Pp. 121-140.

94. Генс Г. В., Левнер Е. В. Дискретные оптимизационные задачи и эффективные приближенные алгоритмы (обзор) // Известия АН СССР. Техническая кибернетика. 1976. № 6. С. 84-92.

95. Сергиенко И. В., Лебедева Т. Т., Рощин В. А. Приближенные методы решения дискретных задач оптимизации. – Киев: Наукова думка. – 1981. – 272 с.

96. Финкельштейн Ю. Ю. Приближенные методы и прикладные задачи дискретного программирования. – М.: Наука. – 1976. – 264 с.

97. Хачатуров В. Р. Аппроксимационно-комбинаторный метод и некоторые его приложения // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1974. Т. 14. № 6. С. 1464-1487.

98. Лбов Г. С. Выбор эффективной системы зависимых признаков – В кн.: Вычислительные системы. – Новосибирск: ИМ СО АН СССР, 1965. – Вып. 19. – С. 21-34.

99. Лбов Г. С. Программа "Случайный поиск с адаптацией для выбора эффективной системы зависимых признаков" // В кн.: Геология и математика. – Новосибирск: Наука. – 1970. – С. 204-219.

100. Foldes S., Hammer P. L. Disjunctive and conjunctive normal forms of pseudo-Boolean functions // Research Report RRR 1-2000. – Piscataway, NJ: Rutgers University Center for Operations Research. – 2000.

101. Foldes S., Hammer P. L. Monotone, Horn and Quadratic Pseudo-Boolean Functions // Journal of Universal Computer Science. – 2000. No. 6(1). – Pp. 97-104.

102. Antamoshkin A. N., Masich I. S. Identification of pseudo-Boolean function properties // Engineering & automation problems. 2007. No. 2. Pp. 66-69.

103. Масич И. С. Методы определения свойств алгоритмически заданных псевдобулевых функций // Materialy VII Miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji “Perspektywiczne opracowania sa nauka i technikami. 2011. Vol. 51. Matematyka. – Przemysl: Nauka i studia. 2013. – Pp. 84-85.

104. Антамошкин А. Н., Масич И. С. Регулярные алгоритмы для задач условной псевдобулевой оптимизации // САКС-2001: Материалы Международной научно-практической конференции. Ч.2. – Красноярск, 2001. – С. 328-330.

105. Масич И. С. Регулярный алгоритм поиска граничных точек в задаче условной оптимизации монотонных псевдобулевых функций // «Совершенствование технологий поиска и разведки, добычи и переработки полезных ископаемых»: Сб. материалов Всероссийской научно-технической конференции. – Красноярск: КрасГАЦиЗ. – 2003. – С. 170-172.

106. Масич И. С. Сравнительная эффективность регулярных процедур условной оптимизации псевдобулевых функций // Вестник НИИ Систем управления, волновых процессов и технологий. 2002. Вып. 8. С. 160-177.

107. Масич И. С. Алгоритмы случайного поиска для условной оптимизации псевдобулевых функций // VII Королёвские чтения: Всероссийская научная конференция: Тезисы докладов. Том I. – Самара, 2003. – С. 42-43.

108. Масич И. С. Случайный поиск граничных точек в задаче условной псевдобулевой оптимизации // XI Туполевские чтения: Всероссийская научная конференция: Том III. – Казань, 2003. – С. 14.

109. Антамошкин А. Н., Масич И. С. Гриди алгоритмы и локальный поиск для условной псевдобулевой оптимизации // Исследовано в России. 2003. № 177. С. 2143-2149.

110. Feo T., Resende M. G. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures // Journal of Global Optimization. 1995. No. 6. Pp. 109-133.

111. Masich I. S. Comparative efficiency or two schemes of local search in the optimization of pseudo-Boolean functions // Materials of VIII International Scientific-Practical Conference "Actualni vymozenosti vedy - 2014. – Díl. 13. Matematika. – Praha: Publishing House «Education and Science», 2014. – Pp. 21-24.

112. Masich I. S. Search algorithms for combinatorial optimization in diagnosis and prognosis problems // Materiály VIII mezinárodní vědecko - praktická konference «Dny vědy - 2012». – Díl 82. Matematika. – Praha: Publishing House «Education and Science», 2012. – Pp. 63-65.

113. Masich I. S. Combinatorial optimization in foundry production planning // Вестник СибГАУ. 2009. № 2(23). С. 40-44.

114. Антамошкин А. Н., Масич И. С., Кузьмич Р. И. Комбинаторная оптимизация при логической классификации: монография. – Красноярск: Красноярский государственный аграрный университет, 2015. – 130 с.

## References

1. Crama Y., Hammer P. L. *Boolean Functions: Theory, Algorithms, and Applications*. New York, Cambridge University Press, 2011, 687 p.

2. Kazakovtsev L. A. Podkhody k avtomatizatsii zadach planirovaniia assortimenta na torgovykh predpriiatiiakh [Approaches to Automating Tasks of Assortment Planning in Trade]. *Vestnik NII Sistem upravleniia, volnovykh protsessov i tekhnologii,* 2000, no. 5 (in Russian).

3. Imanuilov P. A., Purtikov V. A. Reshenie zadachi formirovaniia kreditnogo portfelia banka metodom Miver [Solution of the Problem of Formation of the Loan Portfolio by Miver]. *Vestnik NII Sistem upravleniia, volnovykh protsessov i tekhnologii,* 2000, no. 5 (in Russian).

4. Ashrafi N., Berman O., Cutler M. Optimal Design of Large Software Systems Using N-Version Programming. *In IEEE Transactions on Reliability*. 1994, vol. 43, no. 2, pp. 344-350.

5. Avizienis A. The Methodology of N-Version Programming. *Software Fault Tolerance*. Edited by M. R. Lyu. Chichester, Wiley, 1995, pp. 23-47.

6. Antamoshkin A. N. *Optimizatsiia funktsionalov s bulevymi peremennymi* [Optimizing of Functionals with Boolean Variables]. Tomsk, Tomsk University, 1987, 218 p. (in Russian).

7. Masich I. S. Metod vetvei i granits v zadache optimizatsii sistem otkazoustoichivogo programmnogo obespecheniia [Branch and Bound Method for the Problem of Optimization Systems of Failover Software]. *Nauchnaia sessiia TUSUR. Materialy dokladov mezhregional'noi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Scientific Session TUSUR. Proceedings of the Inter-Regional Scientific and Technical Conference]. Tomsk, 2002, pp. 31-34 (in Russian).

8. Masich I. S. Multi-version Methods of Software Reliability Growth in Intelligence Systems. *Intelligent Systems: Proceeding of the Fifth International Symposium*. Moscow, BMSTU, 2002, pp. 74-76.

*9. Sistemnyi analiz: proektirovanie, optimizatsiia i prilozheniia* [System Analysis, Design and Optimization], edited by A. N. Antamoshkin, Krasnoyarsk, SAA, 1996 (in Russian).

10. Iudin D. B., Goriashko A. P., Nemirovskii A. S. *Matematicheskie metody optimizatsii ustroistv i algoritmov ASU* [Mathematical Methods of Optimization Algorithms and Automation Devices]. Moscow, Radio i sviaz' [Radio and Communications], 1982, 288 p. (in Russian).

11. Barahona F., Grotschel M., Junger M., Reinelt G. An Application of Combinatorial Optimization to Statistical Physics and Circuit Layout Design, *Operation Research,* 1988, no. 36, pp. 493-513.

12. *System Analysis, Design and Optimization. An Introduction*, general editing by A. Žilinskas. Krasnoyarsk, 1993, 203 p.

13. Masich I. S. Poiskovye algoritmy psevdobulevoi optimizatsii v zadachakh diagnostiki i prognozirovaniia [Search Algorithms Pseudoboolean Optimization in Problems of Diagnosis and Prognosis]. *Sbornik trudov 9 Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Issledovanie, razrabotka i primenenie vysokikh tekhnologii v promyshlennosti»* [Proceedings of the 9 International Scientific and Practical Conference "Research, Development and Application of High Technologies in the Industry"], vol. 3. St. Petersburg, 2010, pp. 89-90. (in Russian).

14. Karp R. M., Miller R. G., Thatcher J. W. Reducibility Among Combinatorial Problems, *Journal of Symbolic Logic*. 1975, no. 40 (4), pp. 618-619.

15. Ranyard R. H. An Algorithm for Maximum Likelihood Ranking and Slater's i From Paired Comparisions. *British Journal of Mathematical and Statistical Psychology,* 1976, no. 29, pp. 242-248.

16. Rao M. R. Cluster Analysis and Mathematical Programming. *Journal of the American Statistical Association,* 1971, vol. 66, pp. 622-626.

17. Masich I. S. Poiskovye algoritmy kombinatornoi optimizatsii v zadachakh klassifikatsii dannykh [Search Algorithms of Combinatorial Optimization Problems in Data Classification]. *Sbornik statei XI Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Fundamental'nye i prikladnye issledovaniia, razrabotka i primenenie vysokikh tekhnologii v promyshlennosti»* [Proceedings of XI International Scientific-Practical Conference "Fundamental and Applied Research, Development and Application of High Technologies in the Industry"], vol. 3. St. Petersburg, 2011, pp. 91-92 (in Russian).

18. Hammer P. L., Shliffer E. Applications of Pseudo-Boolean Methods to Economic Problems. *Theory and decision,* 1971, no. 1, pp. 296-308.

19. Masich I. S., Kraeva E. M. Logicheskie algoritmy klassifikatsii v zadachakh upravleniia sel'skokhoziaistvennoi deiatel'nost'iu [Logical Classification Algorithms in Control Agricultural Activity]. *Innovatsionnye tendentsii razvitiia rossiiskoi nauki: materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Innovative trends in the development of Russian science: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2013, pp. 123-125 (in Russian).

20. Hillier F. S. *The Evaluation of Risky Interrelated Investments*. Amsterdam, North-Holland Publishing, 1969.

21. Laughhunn D. J. Quadratic Binary Programming with Applications to Capital Budgeting Problems. *Operations Research,* 1970, no. 18, pp. 454-461.

22. Laughhunn D. J., Peterson D. E. Computational Experience with Capital Expenditure Programming Models under Risk. *Business Finance,* 1971, no. 3, pp. 43-48.

23. Masich I. S. Kombinatornye algoritmy optimizatsii v zadache raspredeleniia zemli pri proizvodstve polevykh kul'tur [Combinatorial Optimization Algorithms in the Problem of Land Distribution in the Production of Field Crops]. *Innovatsionnye tendentsii razvitiia rossiiskoi nauki: materialy VI mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Innovative trends in the development of Russian science: Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2013, pp. 125-126 (in Russian).

24. Masich I. S., Kraeva E. M. Logicheskii analiz dannykh i algoritmy raspoznavaniia v zadachakh upravleniia sel'skokhoziaistvennoi deiatel'nost'iu [Logical Data Analysis and Pattern Recognition Algorithms in Control Agricultural Activity]. *Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiia: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science and education: experience, problems and perspectives of development: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2013, pp. 301-303 (in Russian).

25. Weingartner H. M. Capital Budgeting of Interrelated Projects: Survey and Synthesis. *Management Science,* 1966, no. 12, pp. 485-516.

26. Masich I. S. Model' i algoritmy optimizatsii dlia zadachi raspredeleniia zemli pri proizvodstve polevykh kul'tur [Model and Optimization Algorithms for the Problem of Land Distribution in the Production of Field Crops]. *Nauka i obrazovanie: opyt, problemy, perspektivy razvitiia: materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Science and education: experience, problems and perspectives of development: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2013, pp. 303-304 (in Russian).

27. Hammer P. L. Pseudo-Boolean Remarks on Balanced Graphs. *International Series of Numerical Mathematics,* 1977, no. 36, pp. 69-78.

28. Ebenegger Ch., Hammer P. L., de Werra D. Pseudo-Boolean Functions and Stability of Graphs. *Annals of Discrete Mathematics,* 1984, no. 19, pp. 83-97.

29. Masich I. S. Algoritmy kombinatornoi optimizatsii dlia planirovaniia zagruzki liteinogo proizvodstva [Combinatorial Optimization Algorithms for Capacity Planning Foundry]. *Materialy VII Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Tatishchevskie chteniia: aktual'nye problemy nauki i praktiki»* [Proceedings of the VII International scientific-practical conference "Tatishchev read: actual problems of science and practice"]. Tolyatti, 2010, pp.3-10 (in Russian).

30. Crama Y. Combinatorial Optimization Models for Production Scheduling in Automated Manufacturing Systems. *European Journal of Operational Research*. 1997, no. 99, pp. 136-153.

31. Antamoshkin A. N., Degterev D. A., Masich I. S. Reguliarnyi algoritm optimizatsii zagruzki oborudovaniia [Regular Optimization Algorithm Loading Equipment]. *Trudy konf. «Informatsionnye nedra Kuzbassa»* [Proceedings of the Conference "Information bowels of Kuzbass"]. Kemerovo, 2003, pp. 59-61 (in Russian).

32. Bilbao J. M. *Cooperative Games on Combinatorial Structures*. Norwell, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 2000.

33. Hammer P. L., Holzman R. Approximations of Pseudo-Boolean Functions: Applications to Game Theory. *Methods and Models of Operations Research,* 1992, no. 36, pp. 3-21.

34. Crama Y., Hammer P. L. Bimatroidal Independence Systems. *Mathematical Methods of Operations Research*. 1989, vol. 33, no. 3, pp. 149-165.

35. Welsh D. J. A. *Matroid Theory*. London, Academic Press, 1976.

36. Fraenkel A. S., Hammer P. L. Pseudo-Boolean Functions and Their Graphs. *Annals of Discrete Mathematics,* 1984, no. 20, pp. 137-146.

37. Hammer P. L., Hansen pp., Simeone B. Upper Planes of Quadratic 0-1 Functions and Stability in Graphs. *Nonlinear Programming*, 1981, no. 4, pp. 395-414.

38. Nieminen J. A Linear Pseudo-Boolean Viewpoint on Matching and Other Central Concepts in Graph Theory. *Zastosowania Matematyki*, 1974, no. 14, pp. 365-369.

39. Masich I. S. Otbor sushchestvennykh faktorov v vide zadachi psevdobulevoi optimizatsii [The Selection of the Essential Factors in the Form of Pseudo-Boolean Optimization Problem]. *Reshetnevskie chteniia: Tez. dokl. VII Vseros. nauch. konf.* [Reshetnev reading: Proceedings of the VII All-Russian Scientific Conference]. Krasnoyarsk, 2003, pp. 234-235 (in Russian).

40. Masich I. S. Lokal'naia optimizatsiia dlia zadachi vybora informativnykh faktorov [Local Optimization for the Problem of the Choice of Informative Factors]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii. Materialy dokladov vserossiiskoi nauchnoi konferentsii* [Science. Technologies. Innovation. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference]. Novosibirsk, 2003, vol. 1, pp. 50-51 (in Russian).

41. Masich I. S. Povyshenie kachestva raspoznavaniia logicheskikh algoritmov klassifikatsii putem otbora informativnykh zakonomernostei [Improving the Quality of Recognition Logic Classification Algorithms by Selecting Informative Patterns]. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Information Systems and Technology: Proceedings of the International scientific and technical conference]. Krasnoyarsk, 2012, pp. 149-153 (in Russian).

42. Masich I. S. Zadachi optimizatsii i ikh svoistva v logicheskikh algoritmakh raspoznavaniia [Optimization Problems and Their Properties in Logical Recognition Algorithms]. *Problemy optimizatsii i ekonomicheskie prilozheniia: materialy V Vserossiiskoi konferentsii* [Problems of optimization and economic applications: Proceedings of the V All-Russian Conference]. Omsk, 2012 (in Russian).

43. Masich I. S. Kombinatornaia optimizatsiia i logicheskie algoritmy klassifikatsii v zadache prognozirovaniia oslozhnenii infarkta miokarda [Combinatorial Optimization Algorithms and Logical Classification Task of Predicting Complications of Myocardial Infarction]. *Innovatsionnye tendentsii razvitiia rossiiskoi nauki: materialy III Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Innovative trends in the development of Russian science: Proceedings of the III International Scientific-Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2010, pp. 276-280 (in Russian).

44. Hammer P. L., Rudeanu S. *Boolean Methods in Operations Research and Related Areas*. Berlin, Springer-Verlag; New York, Heidelberg, 1968, 310 p.

45. Boros E., Hammer P. L. Pseudo-Boolean Optimization. *Discrete Applied Mathematics*, 2002, no. 123(1-3), pp. 155-225.

46. Beresnev V. L., Ageev A. A. Algoritmy minimizatsii dlia nekotorykh klassov polinomov ot bulevykh peremennykh [Minimization Algorithms for Some Classes of Polynomials in Boolean Variables]. *Modeli i metody optimizatsii* [Models and methods of optimization]. Novosibirsk, Nauka, 1988, no. 10, pp. 5-17 (in Russian).

47. Grishukhin V. P. *Polinomial'nost' v prosteishei zadache razmeshcheniia* [Polynomial in the Simplest Problem of Accommodation]. Preprint TsEMI AN SSSR [Preprint CEMI AS USSR]. Moscow, 1987, 64 p. (in Russian).

48. Kovalev M. M. Diskretnaia optimizatsiia (tselochislennoe programmirovanie) [Discrete Optimization (Integer Programming)]. Minsk, Publishing house of BSU, 1977, 191 p. (in Russian).

49. Korbut A. A., Finkel'shtein Iu. Iu. Diskretnoe programmirovanie [Discrete Programming]. Moscow, Nauka, 1969, 389 p. (in Russian).

50. Allemand K., Fukuda K., Liebling T. M., Steiner E. A Polynomial Case of Unconstrained Zero-One Quadratic Optimization, *Mathematical Programming*, Ser. A, 2001, no. 91, pp. 49-52.

51. Barth P. *A Davis-Putnam Based Enumeration Algorithm for Linear Pseudo-Boolean Optimization*. Technical Report MPI-I-95-2-003. Saarbrücken, Max-Planck-Institut für Informatik, 1995, 19 p.

52. Crama Y. Recognition Problems for Special Classes of Polynomials in 0-1 Variables. *Mathematical Programming*, 1989, no. 44, pp. 139-155.

53. Crama Y., Hansen P., Jaumard B. The Basic Algorithm for Pseudo-Boolean Programming Revisited. *Discrete Applied Mathematics*, 1990, no. 29, pp. 171-185.

54. Werra D. De, Hammer P. L., Liebling T., Simeone B. From linear separability to unimodality: A Hierarchy of Pseudo-Boolean Functions, *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 1998, no. 1, pp. 174-184.

*55*. Hammer P. L., Hansen P., Pardalos P. M., Rader D. J. *Maximizing the Product of Two Linear Functions in 0-1 Variables*, Research Report 2-1997. Piscataway, NJ: Rutgers University Center for Operations Research, 1997.

56. Hammer P. L., Peled U. N. On the Maximization of a Pseudo-Boolean Function. *Journal of the Association for Computing Machinery*, 1972, vol. 19, no. 2, pp. 265-282.

57. Hansen P., Jaumard B., Mathon V. Constrained Nonlinear 0-1 Programming. *Journal on Computing*, 1993, no. 5, pp. 97-119.

58. Martello S., Toth P. The 0-1 Knapsack Problem. *Combinatorial Optimization*. New York, Wiley, 1979, pp. 237-279.

59. Padberg M. W. A Note on Zero-One Programming. *Operations Research*, 1975, no. 23, pp. 833-837.

60. Padberg M. W. Covering, Packing and Knapsack Problems. *Annals of Discrete Mathematics*, 1979, no. 4, pp. 265-287.

61. Wegener I., Witt C. On the Optimization of Monotone Polynomials by Simple Randomized Search Heuristics. *Procs. of GECCO 2003*, pp. 622-633.

62. Adams W. P., Sherali H. D. A Tight Linearization and an Algorithm for Zero-One Quadratic Programming Problems. *Management Science*, 1986, vol. 32, no. 10, pp. 1274-1290.

63. Boros E., Hammer P. L. *A Max-Flow Approach to Improved Roof Duality in Quadratic 0-1 Minimization*. Research Report RRR 15-1989, Piscataway, NJ, Rutgers University Center for Operations Research, 1989.

64. Glover F., Woolsey R. E. Further Reduction of Zero-One Polynomial Programs to Zero-One Linear Programming Problems. *Operations Research*, 1973, no. 21, pp. 156-161.

65. Hansen P., Lu S. H., Simeone B. On the Equivalence of Paved Duality and Standard Linearization in Nonlinear 0-1 Optimization. *Discrete Applied Mathematics*, 1990, no. 29, pp. 187-193.

66. Watters L. G. Reduction of Integer Polynomial Problems to Zero-One Linear Programming Problems. *Operations Research*, 1967, no. 15, pp. 1171-1174.

67. Boros E., Crama Y., Hammer P. L. Chvátal Cuts and Odd Cycle Inequalities in Quadratic 0-1 Optimization. *SIAM Journal on Discrete Mathematics*, 1992, no. 5, pp. 163-177.

68. Boros E., Crama Y., Hammer P. L. Upper Bounds for Quadratic 0-1 Maximization. *Operation Research Letters*, 1990, no. 9, pp. 73-79.

69. Boros E., Hammer P. L. A Max-Flow Approach to Improved Lower Bounds for Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO). *Discrete Optimization*, 2008, vol. 2, no. 5, pp. 501-529.

70. Boros E., Hammer P. L. Cut-Polytopes, Boolean Quadratic Polytopes and Nonnegative Quadratic Pseudo-Boolean Functions. *Mathematics of Operations Research*, 1993, no. 18, pp. 245-253.

71. Hammer P. L., Hansen P., Simeone B. Roof Duality, Complementation and Persistency in Quadratic 0-1 Optimization. *Mathematical Programming*, 1984, no. 28, pp. 121-155.

72. Hammer P. L., Simeone B. Quadratic Functions of Binary Variables. *Combinatorial Optimization: Lecture Notes in Mathematics*. Berlin, Springer-Verlag; New York, Heidelberg, 1989, vol. 1403.

73. Papadimitriou C. H., Steiglitz K. *Combinatorial Optimization*. New York, Dover Publications, 1998.

74. Masich I. S. *Poiskovye algoritmy uslovnoi psevdobulevoi optimizatsii* [Search Algorithms for Conditional Pseudoboolean Optimization]. Krasnoyarsk, Siberian State Aerospace University, 2013, 160 p. (in Russian).

75. Grinchenko S. N. Metod «prob i oshibok» i poiskovaia optimizatsiia: analiz, klassifikatsiia, traktovka poniatiia «estestvennyi otbor» [The Method of "Trial and Error" and Search Engine Optimization: Analysis, Classification, Interpretation of the Concept of "Natural Selection"]. *Investigated in Russia*, 2003, no. 104, pp. 1228-1271 (in Russian).

76. Rastrigin L. A. *Adaptatsiia slozhnykh sistem* [Adaptation of Complex Systems]. Riga, Zinatne Publ., 1981, 375 p. (in Russian).

77. Grinchenko S. N. Ierarkhicheskaia optimizatsiia v prirodnykh i sotsial'nykh sistemakh: selektsiia variantov prisposobitel'nogo povedeniia i evoliutsii sistem "dostatochno vysokoi slozhnosti" na osnove adaptivnykh algoritmov sluchainogo poiska [Hierarchical Optimization of Natural and Social Systems: the Selection of Variants Of Adaptive Behavior And Evolutionary Systems "Rather High Difficulty" on the Basis of Adaptive Random Search Algorithms]. *Investigated in Russia*, 2000, no. 108, pp. 1421-1440 (in Russian).

78. Grinchenko S. N. Sluchainyi poisk, adaptatsiia i evoliutsiia: ot modelei biosistem - k iazyku predstavleniia o mire [Random Search, Adaptation And Evolution: from Models of Biological Systems to the Language of View of the World]. *Investigated in Russia*, 1999, no. 10 (in Russian).

79. Goldberg D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. Boston: Addison-Wesley, 1989.

80. Schwefel H.-P. *Evolution and Optimum Seeking*. New York, Whiley, 1995, 612 p.

81. Björklund H., Petersson V., Vorobjov S. *Experiments with Iterative Improvement Algorithms on Completely Unimodal Hypercubes*. Technical report 2001-017. Uppsala, Sweden, Uppsala University, 2001, 30 p.

82. Björklund H., Sandberg S., Vorobjov S. *Optimization on Completely Unimodal Hypercubes*. Technical report 2002-018. Uppsala, Sweden, Uppsala University, 2002, 39 p.

83. Masich I. S. Heuristic Algorithms for Searching Boundary Points in Pseudo-Boolean Optimization Problems. *Proceedings of IX International Scientific - Practical Conference "Effective Tools of Modern Science - 2013»*, Mathematics. Praha, Publishing House «Education and Science», 2013, vol. 40, pp. 54-57.

84. Masich I.S. Random and Greedy Search Algorithms for Conditional Pseudo-Boolean Optimization. *Proceedings of the 9th International Scientific Practical Conference "New Advanced Science"*, Mathematics. Sofia, 2013, vol. 53, pp. 49-51.

85. Antamoshkin A. N. *Reguliarnaia optimizatsiia psevdobulevykh funktsii* [Regular Optimization of Pseudo-Boolean Functions]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk University, 1989, 284 p. (in Russian).

86. Antamoshkin A. N., Rassokhin V. S. *Optimizatsiia polimodal'nykh psevdobulevykh funktsii* [Optimization of Multimodal Pseudo-Boolean Functions] // OFAP Ministry of Higher Education of the RSFSR. Inv. no. 85119. Moscow. 1985, 43 p. (in Russian).

87. Antamoshkin A. Regular Optimization of Pseudoboolean Functions. *System Modelling and Optimization*. Budapest, 1985, pp. 17-18.

88. Masich I. S. Reguliarnyi algoritm poiska granichnykh tochek v zadache uslovnoi optimizatsii monotonnykh psevdobulevykh funktsii [Regular Search Algorithm of the Boundary Points in a Constrained Optimization Problem of Pseudo-Monotone Functions]. *«Sovershenstvovanie tekhnologii poiska i razvedki, dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh»: Sb. materialov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* ["Improvement of Technologies for Prospecting and Exploration, Mining and Processing Mineral Resources": Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference]. Krasnoyarsk, 2003, pp. 170-172 (in Russian).

89. Masich I. S. Reshenie zadach uslovnoi psevdobulevoi optimizatsii posredstvom obobshchennykh shtrafnykh funktsii [Solving problems of conditional pseudo-optimization by means of generalized penalty functions]. Vestnik molodykh uchenykh [Bulletin of Young Scientists], 2004, no. 4, pp. 63-69 (in Russian).

90. Masich I. S. Priblizhennye algoritmy poiska granichnykh tochek dlia zadachi uslovnoi psevdobulevoi optimizatsii [Approximate Algorithms for Finding the Boundary Points for the Pseudo-Problem of Conditional Optimization]. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of Siberian State Aerospace University], 2006, vol. 1(8), pp. 39-43 (in Russian).

91. Garey M. R., Johnson D. S. *Computers and Intractability: a Guide to the Theory of NP-completeness*. San Francisco, W. H. Freeman and Company, 1979.

*92*. Kreinovich V., Lakeyev A., Rohn J., Kahl P. *Computational Complexity and Feasibility of Data Processing and Interval Computations*, Norwell, Massachusetts, Kluwer Academic Publishers, 1998, 460 p.

93. Lenstra J. K., Rinnooy Kan A. H. G. Computational Complexity of Discrete Optimization Problems. *Annals of Discrete Mathematics*, 1979, no. 4, pp. 121-140.

94. Gens G. V., Levner E. V. Diskretnye optimizatsionnye zadachi i effektivnye priblizhennye algoritmy (obzor) [Discrete Optimization Problems and Efficient Approximate Algorithms (Review)]. *Izvestiia AN SSSR. Tekhnicheskaia kibernetika* [News of the Academy of Sciences of the USSR. Technical Cybernetics], 1976, no. 6, pp. 84-92 (in Russian).

95. Sergienko I. V., Lebedeva T. T., Roshchin V. A. *Priblizhennye metody resheniia diskretnykh zadach optimizatsii* [Approximate Methods for Solving Discrete Optimization Problems]. Kiev, Naukova dumka, 1981, 272 p. (in Russian).

96. Finkel'shtein Iu. Iu. *Priblizhennye metody i prikladnye zadachi diskretnogo programmirovaniia* [Approximate Methods and Applied Problems of Discrete Programming]. Moscow, Nauka, 1976, 264 p. (in Russian).

97. Khachaturov V. R. Approksimatsionno-kombinatornyi metod i nekotorye ego prilozheniia [Approximation-Combinatorial Method and Some Applications]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki* [Journal of Numerical Mathematics and Mathematical Physics], 1974, vol. 14, no. 6, pp. 1464-1487 (in Russian).

98. Lbov G. S. Vybor effektivnoi sistemy zavisimykh priznakov [Choosing an Effective System of Dependent Features]. *Vychislitel'nye sistemy* [Computer Systems], 1965, no. 19, pp. 21-34 (in Russian).

99. Lbov G. S. Programma "Sluchainyi poisk s adaptatsiei dlia vybora effektivnoi sistemy zavisimykh priznakov" [The Program "Random Search with Adaptation to Select an Effective System of Dependent Attributes"]. *Geologiia i matematika* [Geology and Mathematics]. Novosibirsk, Nauka, 1970, pp. 204-219 (in Russian).

100. Foldes S., Hammer P. L. *Disjunctive and Conjunctive Normal Forms of Pseudo-Boolean Functions*. Research Report RRR 1-2000. Piscataway, NJ, Rutgers University Center for Operations Research, 2000.

101. Foldes S., Hammer P. L. Monotone, Horn and Quadratic Pseudo-Boolean Functions. *Journal of Universal Computer Science*, 2000, no. 6(1), pp. 97-104.

102. Antamoshkin A. N., Masich I. S. Identification of Pseudo-Boolean Function Properties. *Engineering & automation problems*, 2007, no. 2, pp. 66-69.

103. Masich I. S. Methods for Determination of Properties of Algorithmically Defined Pseudoboolean Functions. *Proceedings of the VII International Scientific-Practical Conference "Prospective Studies of Science and Techniques - 2011"*, Mathematics. Przemysl, Studying, 2013, vol. 51, pp. 84-85.

104. Antamoshkin A. N., Masich I. S. Reguliarnye algoritmy dlia zadach uslovnoi psevdobulevoi optimizatsii [Regular Algorithms for Constrained Pseudo-Boolean Optimization Problems]. *SAKS-2001: Materialy Mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference]. Krasnoyarsk, 2001, vol. 2, pp. 328-330 (in Russian).

105. Masich I. S. Reguliarnyi algoritm poiska granichnykh tochek v zadache uslovnoi optimizatsii monotonnykh psevdobulevykh funktsii [Regular Search Algorithm of the Boundary Points in a Constrained Optimization Problem of Pseudoboolean Monotone Functions]. *«Sovershenstvovanie tekhnologii poiska i razvedki, dobychi i pererabotki poleznykh iskopaemykh»: Sb. materialov Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* ["Improvement of technologies for prospecting and exploration, mining and processing mineral resources": Proceedings of All-Russian Scientific and Technical Conference]. Krasnoyarsk, KrasGATsiZ Publ., 2003, pp. 170-172 (in Russian).

106. Masich I. S. Sravnitel'naia effektivnost' reguliarnykh protsedur uslovnoi optimizatsii psevdobulevykh funktsii [Comparative Efficacy of the Regular Procedures for of Pseudoboolean Constrained Optimization of Functions]. *Vestnik NII Sistem upravleniia, volnovykh protsessov i tekhnologii* [Bulletin of the Research Institute of Control Systems, Wave Processes and Technology], 2002, no. 8, pp. 160-177 (in Russian).

107. Masich I. S. Algoritmy sluchainogo poiska dlia uslovnoi optimizatsii psevdobulevykh funktsii [Random Search Algorithms for Constrained Optimization of Pseudoboolean Functions]. *VII Korolevskie chteniia: Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia* [VII Korolyev Reading: Proceedings of All-Russian Scientific Conference]. Samara, 2003, vol. 1, pp. 42-43 (in Russian).

108. Masich I. S. Sluchainyi poisk granichnykh tochek v zadache uslovnoi psevdobulevoi optimizatsii [Random Search of the Boundary Points in a Constrained Pseudo-Boolean Optimization Problem]. *XI Tupolevskie chteniia: Vserossiiskaia nauchnaia konferentsiia* [XI Tupolev Reading: Scientific Conference]. Kazan, 2003, vol. 3, pp. 14 (in Russian).

109. Antamoshkin A. N., Masich I. S. Gridi algoritmy i lokal'nyi poisk dlia uslovnoi psevdobulevoi optimizatsii [Greedy and Local Search Algorithms for the Conditional Pseudoboolean Optimization]. *Investigated in Russia*, 2003, no. 177, pp. 2143-2149 (in Russian).

110. Feo T., Resende M. G. Greedy Randomized Adaptive Search Procedures. *Journal of Global Optimization* 6, 1995, pp. 109-133.

111. Masich I. S. Comparative Efficiency or Two Schemes of Local Search in the Optimization of Pseudo-Boolean Functions. *Proceedings of VIII International Scientific-Practical Conference "Current Achievements in Science – 2014"*, Matematics. Praha, Publishing House «Education and Science», 2014, vol. 13, pp. 21-24 (in Russian).

112. Masich I. S. Search Algorithms for Combinatorial Optimization in Diagnosis and Prognosis Problems. *Proceedings of the VIII International Scientific - Practical Conference «Days of Science - 2012»,* Mathematics. Praha, Publishing House «Education and Science», 2012, vol. 82, pp. 63-65.

113. Masich I. S. Combinatorial Optimization in Foundry Production Planning. *Vestnik SibGAU* [Bulletin of Siberian State Aerospace University], 2009, no. 2(23), pp. 40-44.

114. Antamoshkin A. N., Masich I. S., Kuz'mich R. I. *Kombinatornaia optimizatsiia pri logicheskoi klassifikatsii* [Combinatorial Optimization at the Logical Classification]. Krasnoyarsk, Krasnoyarsk State Agrarian University, 2015, 130 p. (in Russian).

**Статья поступила 22 декабря 2015 г.**

## Информация об авторах

*Антамошкин Александр Николаевич* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры системного анализа и исследования операций. Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: моделирование и оптимизация сложных систем. Тел.: +7 (391) 2919141. E-mail: oleslav@mail.ru

*Масич Игорь Сергеевич* – кандидат физико-математических наук, доцент. Доцент кафедры системного анализа и исследования операций. Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева. Область научных интересов: комбинаторная оптимизация, интеллектуальный анализ данных. Тел.: +7 (391) 2919141. E-mail: i-masich@yandex.ru

Адрес: 660037, Россия, г. Красноярск, пр. им. газеты Красноярский рабочий, д. 31.

---

# Search Algorithms for Constrained Pseudo-Boolean Optimization

A. N. Antamoshkin, I. S. Masich

***Problem statement****. The issue is the problem of optimizing real functions of binary variables that is the so-called pseudo-Boolean optimization problem. In many practical problems, possible combinations of variables are restricted by constraints that narrow the set of admissible values of the control variables. At the same time these constraints (and an objective function) often have structural properties, inclusion of which in the optimization process can improve the efficiency of solving such problems. Furthermore, in many real problems of optimization a part of functions (criteria and constraints) or all functions are defined algorithmically, which makes it impossible to apply the standard algorithms and requires the development of search optimization procedures.* ***Purpose****. To justify, construct and research methods for constrained pseudo-Boolean optimization problems with algorithmically given functions.* ***Methods****. Research of properties of the space of Boolean variables and detection of patterns for behavior of pseudo-Boolean functions in the space of Boolean variables. Development of exact regular algorithms that implement properties of specific classes of problems. In the development of regular algorithms, the classes of unimodal, monotone and structurally monotone pseudo-Boolean functions are considered. For large-scale problems research of algorithms based on a random search method that search among the boundary points of the*

*feasible set.* ***Results****. The new exact algorithms with analytical estimates of complexity for solving the constrained pseudo-Boolean optimization problems. These algorithms realize information complexity of the problem classes. As well the new approximate algorithms are constructed for constrained optimization of monotone pseudo-Boolean functions with a large number of variables.* ***Practical relevance****. The developed algorithms are useful for solving all practical problems which are reduced to optimization problems of pseudo-Boolean functions. So, the problem of optimizing the capacity utilization of foundry is solved. The developed algorithms are used for finding logical patterns (used for building classifiers) in data that is the constraint pseudo-Boolean optimization problem of large dimension.*

***Key words****: pseudo-Boolean functions, optimization, random search, greedy algorithm, regular optimization algorithm.*

## Information about Authors

Antamoshkin Alexander Nikolaevich – Dr. habil. of Engineering Science, Professor. Professor at the Department of Systems Analysis and Operations Research. Reshetnev Siberian State Aerospace University. Field of research: complex systems modelling and optimization. Tel.: +7 (391) 2919141. E-mail: oleslav@mail.ru

Masich Igor Sergeevich – Ph.D. of Physico-Mathematical Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Systems Analysis and Operations Research. Reshetnev Siberian State Aerospace University. Field of research: combinatorial optimization, data mining. Tel.: +7 (391) 2919141. E-mail: i-masich@yandex.ru

Address: Russia, 660037, Krasnoyarsk, pr. Krasnoyarskiy rabochiy, 31.

УДК 621.39

# Методический аппарат комплексного прогнозирования развития инфокоммуникаций

Кузовкова Т. А., Женчур М. А., Кузовков А. Д.

***Постановка задачи:*** *инфокоммуникации оказывают инфраструктурное влияние на внешнюю социально-экономическую среду и зависят от развития макроэкономики и благосостояния пользователей инфокоммуникационных услуг и технологий. Многофакторное и динамичное развитие инфокоммуникаций диктует необходимость системного подхода к разработке аппарата прогнозирования их развития.* ***Целью работы*** *является обоснование методического аппарата комплексного прогнозирования развития инфокоммуникаций на основе выявленных закономерностей научно-технического прогресса, макрогенерации услуг, роста потребностей в передаче информации, корреляционной взаимосвязи с экономическим ростом, действия информационно-экономического закона, условий и циклов социально-экономического развития страны.* ***Используемые методы:*** *разработка долгосрочных прогнозов осуществлялась на основе комплекса методов и моделей экстраполяции, авторегрессии, корреляции, структурного и факторного анализа.* ***Результат*** *состоит в формировании методического аппарата комплексного долгосрочного прогнозирования развития инфокоммуникаций на основе факторов и закономерностей отраслевого производства во взаимосвязи с развитием национальной экономикой.* ***Практическая значимость:*** *научное обоснование параметров и моделей методического аппарата прогнозирования развития инфокоммуникаций дает возможность более объективно и комплексно прогнозировать перспективы развития инфокоммуникационного сектора экономики.*

***Ключевые слова:*** *инфокоммуникации, информационно-экономический закон, статистические методы корреляции и регрессии, трендовые и факторные модели.*

## Введение

Инфокоммуникационный сектор экономики – это сложная технико-экономическая открытая система, которая включает в себя совокупность информационных ресурсов и программно-аппаратных средств, вычислительной и телекоммуникационной техники, технологий и сетей, а также другие элементы производства инфокоммуникационных услуг и инфраструктуры рыночной экономики.

При прогнозировании такой инфраструктурной отрасли необходимо учитывать не только характер научно-технического прогресса и структурные сдвиги в отраслевой экономике, влияние макроэкономической динамики и факторов на тенденции развития инфокоммуникаций, но и их роль в построении информационного общества и взаимосвязь с развитием национальной экономики. Для этого не подходят известные методы анализа и моделирования, раскрывающие динамические и структурные процессы замкнутой системы, а необходима разработка специфического методического аппарата прогнозирования социально-экономических процессов открытой системы инфокоммуникаций с учетом взаимного влияния и воздействия инфокоммуникационного сектора и национальной экономики.

Взаимосвязь развития инфокоммуникаций и макроэкономики, существование особого каталитического эффекта взаимного влияния научно-технического развития инфокоммуникаций и всех секторов экономики и

социума, особенности производимого продукта – услуг, специфика производственных ресурсов, технологий и организации процессов передачи и обработки информации и потребления инфокоммуникационных услуг обусловливают не только своеобразие действия экономических законов в отрасли инфокоммуникаций, но и применения специфических методов анализа и прогнозирования развития отрасли и ее компонентов.

## Обоснование методов прогнозирования развития инфокоммуникаций

Прогнозирование является частью общей системы планирования, предназначенной для предвидения событий на ближайшую и отдаленную перспективы [1-3]. Планирование в его самом общем значении представляет собой процесс научного или эмпирического обоснования целей и приоритетов социально-экономического развития хозяйствующих субъектов различного уровня с определением путей и средств их достижения. Система планирования основана на определенных теоретических и методологических положениях, представляющих собой систему требований, принципов и методов, раскрытых во многих теоретических литературных источниках [4-7].

Основные виды планирования различаются в зависимости от целей и периода упреждения. Краткосрочное (оперативное) планирование используется для обоснования бизнес-планов и производственных программ предприятия и его подразделений, а также для разработки мер по обеспечению выполнения намеченных параметров. Среднесрочное планирование предназначено для разработки и принятия направлений экономического, технического и социального развития предприятия, отрасли, национальной экономики и установления важнейших производственно-экономических пропорций. Долгосрочное стратегическое планирование – прогнозирование предназначено для выбора стратегических целей и определения важнейших направлений экономического развития предприятия, отрасли, национальной экономики.

Исследованию влияния научно-технических и социально-экономических факторов на развитие секторов связи, информационных технологий, инфокоммуникаций и спрос в сфере инфокоммуникационных услуг посвящено целое научное направление. Отечественными и зарубежными учеными разработаны многочисленные методы и методики, в том числе экономико-математические [8-13]. Однако, применение уже известных методов и моделей к динамично развивающейся отрасли инфокоммуникаций, являющейся открытой системой, оказывающей влияние на внешнюю среду и одновременно подвергающейся воздействию извне, дает противоречивые результаты прогнозирования ее развития.

Для достоверного прогнозирования тенденций и структуры развития инфокоммуникаций необходима разработка специфичной системы прогнозирования, учитывающей не только выявленные закономерности научно-технического прогресса, макрогенерации услуг, роста потребностей в передаче информации, но и сценарные условия социально-экономического развития страны и экономические циклы ее развития.

В современных условиях кардинальной трансформации отраслевой и национальной экономик недостаточно научно обосновать суждение о возможном состоянии объекта в будущем, необходимо качественно-количественное исследование по выявлению закономерностей и тенденций будущего развития объекта, воздействующих на динамику и структуру объекта факторов и источников существенного изменения тенденций, имеющих как внешний, так и внутренний характер. Для построения адекватной системы прогнозирования развития инфокоммуникаций (ИК) рассмотрим укрупненную классификацию методов прогнозирования (рис. 1).

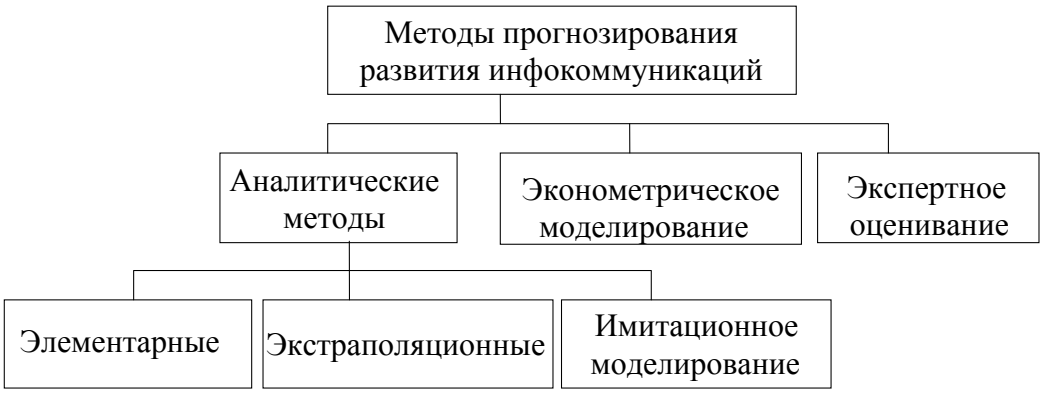



Рис. 1. Классификация методов прогнозирования развития инфокоммуникаций

Наибольшее применение получили элементарные методы (метод прямого счета), метод экстраполяции прошлого на будущее, метод регрессионного моделирования и метод логического моделирования. Первые два метода применяются для прогнозирования традиционных услуг, а два последних – для прогнозирования перспективных услуг. Составление экономических и инновационных прогнозов часто сопровождается применением метода экспертных оценок. Для определения спроса и потребностей в услугах связи широко применяются также маркетинговые исследования. Однако применение маркетинговых исследований наиболее целесообразно в условиях уже сложившегося рынка для определения текущего спроса и прогноза спроса на близкое будущее.

Применение эконометрических корреляционно-регрессионных моделей ограничивается кратко и среднесрочной перспективой [23, 24]. В длительной перспективе взаимосвязи между социально-экономическими явлениями кардинально меняются вследствие различной природы их развития. Поэтому на долгосрочную перспективу целесообразны трендовые модели, основанные на экстраполяции, законах развития, а также система уравнений регрессии с включением параметра времени [4, 6, 23-25].

Построение динамических (трендовых) моделей развития основных параметров инфокоммуникаций (доходов, объемов услуг, интенсивности потребления, инвестиций и факторов производства) основано на анализе и моделировании временных рядов. Все сведения, полученные при изучении

изменения явлений во времени, необходимы для планирования и прогнозирования развития инфокоммуникаций.

Для отображения тенденции в развитии явлений чаще всего применяется способ аналитического выравнивания рядов динамики [15, с. 232-235]. При этом способе общее направление в развитии явления выражается плавно изменяющейся линией – трендом, характеризующим тенденцию его динамики. Аналитическая формула этой линии устанавливается математическими методами, при этом выбор формы кривой должен быть обоснован экономически.

Весьма стабильные темпы роста доходов отрасли инфокоммуникаций и ее компонентов за длительный период времени дают основание разрабатывать модели трендов для отражения динамики развития с помощью метода экстраполяции и использовать результаты трендового моделирования для средне и долгосрочного прогнозирования.

Статистическое изучение различных социально-экономических явлений и процессов в отрасли инфокоммуникаций позволяет количественно выразить сложные взаимосвязи, закономерности развития и использовать их для прогнозирования конъюнктуры рынка, объемов предложения и ресурсов производства. Для характеристики реальных взаимосвязей, проявляющихся в общем, среднем, при большом числе наблюдения, статистика прибегает к изучению стохастических зависимостей, частным случаем которых, является корреляционная связь [15, с. 188-202].

***Задача многофакторного корреляционно-регрессионного анализа*** заключается, во-первых, в изучении целого ряда факторов, влияющих на исследуемый показатель и отборе наиболее значимых; во-вторых, в количественной оценке тесноты связи между результативным признаком и факторными; в-третьих, в определении степени влияния каждого фактора на результативный признак путем построения модели – уравнения множественной регрессии, которая позволяет установить, в каком направлении и на какую величину изменится результативный показатель при изменении каждого фактора, входящего в модель. В связи с высокой трудоемкостью проведения корреляционно-регрессионного анализа для построения моделей, изучения тесноты связи между факторами и оценки достоверности моделирования используется стандартный пакет “STATISTICA” [3, 16].

При исследованиях корреляционных связей важно установить, что первично, что вторично, т.е. каковы причинно-следственные связи между экономическими показателями. Валовой внутренний продукт (ВВП) – основной показатель результатов экономической деятельности всех отраслей и секторов национального хозяйства, поэтому именно ВВП является результативным показателем, а вклады отдельных отраслей, объемы факторов производства (численность занятых, инвестиции в основной капитал и др.), уровень благосостояния трудящихся и т.д. являются факторными признаками в макроэкономической модели.

Другая проблема изучения корреляционно-регрессионных зависимостей состоит в форме выражения социально-экономических показателей (текущие и

сопоставимые цены, абсолютные и относительные показатели) и автокорреляции уровней рядов динамики исследуемых признаков, обусловленной зависимостью уровней данного периода времени от предшествующих им. Первая проблема решается с помощью инструмента расчетов показателей в сопоставимых ценах или условиях, вторая – посредством элиминирования тенденций в анализируемых рядах динамики на основе первых разностей или отклонений фактических уровней от выравненных. На практике чаще используется метод многофакторного моделирования относительных приростных показателей.

## Макроэкономические факторы и информационная база прогнозирования развития инфокоммуникаций

Механизм прогнозирования развития социально-экономических объектов на близкую и далекую перспективы предусматривает проведение качественного (содержательного) анализа объекта, обоснования причинно-следственных связей и основных компонентов его развития, а также и моделей, наиболее достоверно описывающей этот процесс.

Инфокоммуникации относятся к сложным открытым системам, воздействующим на деятельность всех секторов национальной экономики и на которые внешняя среда также оказывает непосредственное влияние. Особенности производства и потребления инфокоммуникационных услуг, технологии и организации процессов передачи, обработки и распределения информации, множество участников рынка инфокоммуникаций обуславливают не только своеобразие действия экономических законов, но и применение специфических методов анализа и прогнозирования.

***На спрос и уровень потребления услуг связи оказывает множество факторов*** различной природы и силы воздействия, которые укрупненно можно разделить на две группы:

1) внешние, отражающие состояние национальной экономики, культуры, социальные условия жизни общества, уровень развития рыночной инфраструктуры и материального благосостояния населения;
2) внутренние – инновационный характер развития технических средств, технологий сетей, систем и масштабы инфраструктуры связи, доступность и качество услуг, конкурентоспособность услуг и сервис их оказания, рыночная структура и бизнес-модели производства и реализации услуг (рис. 2).

***К внешним факторам*** спроса и потребления инфокоммуникационных услуг и развития инфокоммуникаций относятся:

– общеэкономические: темпы роста ВВП и регионального валового продукта, уровень благосостояния пользователей и инвестирования экономики, размер инфляции, доля расходов на инфокоммуникационные услуги в бюджете семьи, степень применения инфокоммуникационных технологий (ИКТ) в экономической деятельности;

– институциональные: степень монополизма и конкуренции, уровень развития бизнес-процессов и рыночной инфраструктуры, формы собственности и государственного регулирования;
– демографические: численность населения, занятых в экономике, половозрастной состав пользователей, территориальная структура населения (проживающих в городской и сельской местности, по регионам), месторасположение обслуживаемой территории;
– психографические и поведенческие: принадлежность пользователей к социальному слою (организаций – к инновационно-конкурентоспособным секторам экономики), характер деятельности, степень приверженности к виду и форме связи, виртуальной среде общения, готовность к новым услугам интеллектуальной и дистанционной формы, готовность к интерактивному общению с производителями услуг и генерации инфокоммуникационных услуг.

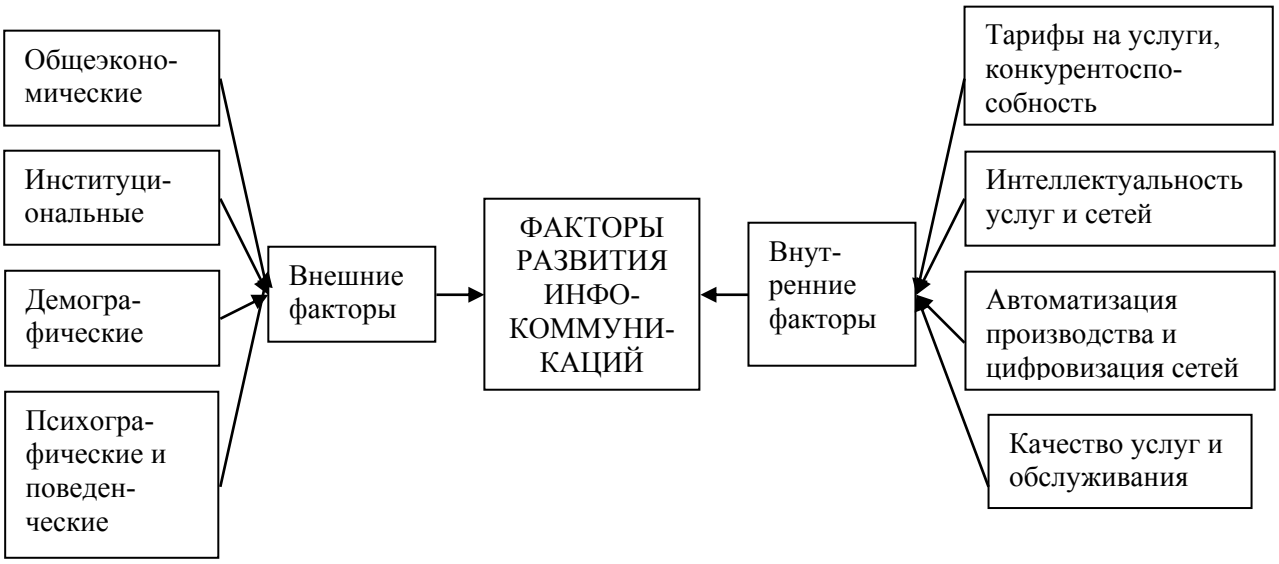



Рис. 2. Факторы, оказывающие влияние на развитие инфокоммуникаций

***Внутренние факторы*** формирования спроса на инфокоммуникационные услуги включают производственно-сетевые: гамма услуг, уровень тарифов, конкурентоспособности, степень автоматизации и цифровизации систем передачи информации, уровень инновационности применяемых технологий и доступности сети; и качественные: скорость отработки и передачи информации, сервисность и культура обслуживания, надежность связи и безопасность средств инфокоммуникаций, интеллектуальность сетей и услуг.

Вариация разных категорий и групп пользователей по видам и способам связи, формам услуг и категориям Web-приложений, а также факторов, формирующих платежеспособный спрос на инфокоммуникационные услуги, обуславливают комплексный подход к измерению влияния количественных факторов на основе статистического наблюдения, качественных факторов на основе экспертных оценок, а также использованию математического аппарата и статистических методов моделирования спроса и развития инфокоммуникаций. Сетевой характер построения телекоммуникаций предусматривает

сбалансированность базовых (местных) сетей и междугородных (международных) сетей, отсутствие которой сдерживает развитие не только междугородной телефонной связи, но и подвижной и документальной связи, сети Интернет в регионах Российской Федерации.

Различные темпы динамики развития новых и традиционных операторов, новых и традиционных услуг связи обуславливают значительные структурные сдвиги в отраслевой экономике и на рынке услуг связи, которые необходимо учитывать при прогнозировании. Слияние и взаимное поглощение систем, технологий, сетей и услуг связи и информатики привело к трансформации сущностных характеристик отрасли, факторов производства, участников рыночного пространства в сфере связи и информационных технологий и объединению составных частей в одну отрасль инфокоммуникаций, которая все больше приобретает роль не только инфраструктуры информатизации общества, но и системообразующего фактора всех видов деятельности и социума. Поэтому прогноз развития инфокоммуникаций должен осуществляться во взаимосвязи с макроэкономическими показателями.

При моделировании и прогнозировании особое значение уделяется вопросам описания экономического объекта с помощью наиболее важных показателей, характеризующих его специфические особенности. Для характеристики экономики отрасли инфокоммуникаций как объекта прогнозирования в качестве *значащих параметров*, как правило, принимаются:

- натуральные показатели, определяющие поведение различных категорий потребителей (населения и деловых пользователей) на различных сегментах инфокоммуникационного рынка (объемы реального и относительного потребления услуг в натуральном измерении);
- стоимостные показатели, отражающие сложившийся в определенный период времени баланс между спросом и предложением услуг и инфокоммуникационных технологий с учетом действующей системы цен и тарифов, издержки производства, финансовые результаты и инвестиционные процессы.

Стоимостные показатели могут быть представлены в денежном измерении (например, доходы от услуг, трафика сообщений, соединений, передачи информации, почтовых отправлений) или в виде удельных стоимостных показателей в расчете на одного человека населения (душевые уровни). Натуральные показатели выражаются физическим объемом услуг, технических средств, оборудования, каналов связи, абонентов; обработки и передачи информации или в виде относительных (процент цифровизации сетей и систем) и удельных величин (плотность терминалов на одного или 100 чел.).

Перечень основных макроэкономических показателей, характеризующих состояние экономики России и отрасли связи, представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Основные макроэкономические показатели состояния экономики России и отрасли инфокоммуникаций

| Макроэкономика | Инфокоммуникации |
|---|---|
| ВВП (валовый внутренний продукт) | Доходы от услуг связи, информационных технологий, печати и массовых коммуникаций, инфокоммуникационных услуг |
| Объем производства по секторам экономики | Доходы от услуг по видам связи и секторам инфокоммуникаций |
| Индексы цен (индекс-дефлятор ВВП, индекс потребительских цен, цен производителей в промышленности) | Индексы-дефляторы тарифов на услуги (по видам связи и отрасли в целом), средние доходные таксы на услуги |
| Социальные показатели (среднедушевой уровень ВВП, доходы населения, структура расходов домашних хозяйств) | Объемы услуг для различных категорий пользователей в натуральном и стоимостном выражении, доля расходов потребителей |

Система показателей в моделях прогнозирования видоизменяется под влиянием конъюнктурных изменений рынка услуг инфокоммуникаций в процессе внедрения инновационных телекоммуникационных и информационных технологий в условиях нарастающей конкуренции. Поэтому систематическое, совершенствование системы моделей прогнозирования развития инфокоммуникаций связано, в первую очередь, с уточнением структуры объекта прогнозирования и прогнозного фона, состава и взаимосвязей их элементов. Комплексная отрасль инфокоммуникаций является важной составной частью национальной экономики, поэтому прогнозные показатели социально-экономического развития ее составляющих должны соответствовать всем необходимым параметрам прогноза социально-экономического развития страны.

Изменение объемов предложения основных видов услуг связи на российском рынке за последние 10 лет характеризуется существенным различием тенденций и темпов изменения параметров динамических рядов как в целом по отрасли (ее секторам), так и по производителям услуг. Для отражения уровня и интенсивности потребления инфокоммуникационных услуг необходимыми параметрами прогноза являются телефонная плотность фиксированной связи, плотность терминалов подвижной связи, компьютеров, пользователей Интернет на 100 человек населения [2, 17].

При прогнозировании стоимостных показателей развития отрасли инфокоммуникаций на основе индивидуальных прогнозов тенденций объемов оказываемых услуг, применяемых технических средств и используемых производственных мощностей (каналов, сетей, космических аппаратов) необходимо прогнозирование тарифов на услуги и предоставляемые пользователям средства инфокоммуникаций с учетом рыночного ценообразования, а также политики государственного регулирования тарифов на универсальные услуги связи и услуги операторов, занимающих существенное положение на рынке.

С целью учета влияния макро и микроэкономических факторов на результаты деятельности организаций связи и ВВП привлекаются и другие показатели: численность населения, численность занятых в экономике, доходы и оплата труда работников, объемы промышленного производства, розничной торговли, платных услуг, инвестиции в основной капитал, индексы-дефляторы, обменный курс валют и другие.

В процессе разработки моделей для прогнозирования развития инфокоммуникаций необходимо соблюдать требования к используемой статистической информации как относительно ее достоверности и полноты охвата, так и относительно сопоставимости используемых показателей и характеристик. Чтобы статистические данные были пригодными для обобщения, они должны быть сопоставимы друг с другом по времени, ценам (тарифам) и методологии обследования.

Для проведения аналитических расчетов, обоснования моделей, отражающих тенденции поведения различных параметров развития отрасли инфокоммуникаций, и проведения прогнозирования на различные периоды упреждения исходные данные должны быть определенным образом структурированы и сгруппированы. В табл. 2 представлена укрупненная структура исходных данных для прогнозирования развития инфокоммуникаций на кратко-, средне- и долгосрочный периоды.

Таблица 2 – Структура исходных данных
для долгосрочного прогнозирования развития инфокоммуникаций

| Наименование показателей | Источник информации |
|---|---|
| 1. Доходы и объем услуг компонентов отрасли по основным видам | Отраслевая статистическая отчетность |
| 2. Основные абонентские средства (телефонные аппараты, терминалы подвижной связи, персональные компьютеры, точки доступа в Интернет) | Отраслевая статистическая отчетность |
| 3. Основные технические средства (волоконно-оптические линии связи, цифровые каналы, космические аппараты и др.) | Отраслевая статистическая отчетность |
| 4. Факторы научно-технического прогресса, влияющие на параметры технических средств связи и информатики, инфокоммуникационные технологии | Научные публикации и гипотезы |
| 5. Макроэкономические факторы (ВВП, инвестиции, оплата труда, численность занятых, индексы-дефляторы) | Сценарные условия Минэкономразвития и данные Росстата |

Хотя основной массив исходных данных опирается на отраслевую статистическую отчетность и данные Росстата, для долгосрочного прогнозирования объемов передаваемой информации, параметров скорости передачи и обработки информации, емкости сетей, стоимости, пропускной способности технических средств и технологий в сфере инфокоммуникаций привлекаются данные, содержащиеся в сценариях социально-экономического развития страны и мира, научно-исследовательских отчетах, научных публикациях, предвидениях и гипотезах специалистов и ученых [8, 18-22]. Как

отмечает А.С. Аджемов в [8, с. 6] «предпринимая попытку прогноза будущего инфокоммуникаций, следует учитывать самые разные обстоятельства, поскольку инфокоммуникации стали глобальными и всепроникающими». Точность долгосрочного прогноза развития инфокоммуникаций обеспечивается комплексностью системы прогнозов по разным методам и моделям.

Для прогнозирования социально-экономического развития инфокоммуникаций во взаимосвязи с макроэкономическими тенденциями требуется получение полной, достоверной, научно обоснованной и своевременной статистической информации о социальном, экономическом и демографическом положении в Российской Федерации, а также по отрасли инфокоммуникаций от всех организаций или по полному кругу крупных и средних организаций. Поскольку точность прогнозирования на длительную перспективу зависит от периода упреждения: чем он ближе, тем точнее может быть прогноз, то для разработки прогноза на перспективу в 10–20 лет должны быть пересчитаны стоимостные показатели макроэкономики России и отрасли инфокоммуникаций в сопоставимые цены с учетом инфляции, дефолта.

## Комплексная система прогнозирования развития инфокоммуникаций

Проведенный ретроспективный анализ развития инфокоммуникаций в динамике и с учетом структурных сдвигов, влияния макроэкономических факторов и научно-технического прогресса позволяет увязать систему прогнозирования развития инфокоммуникаций с закономерностями развития факторов, влияющих на спрос в сфере инфокоммуникационных услуг и технологий. Выявление факторов, которые оказывают значимое влияние на развитие инфокоммуникаций, и определение законов их реализации служат методологической основой формирования адекватного аппарата прогнозирования развития инфокоммуникаций, основанного на использовании закономерностей изменения параметров прогноза.

Систематизация закономерностей производства инфокоммуникационных услуг, выявление факторов и законов развития инфокоммуникационной инфраструктуры информационного общества являются базисом совершенствования прикладной экономической теории инфокоммуникаций и создания комплексной системы прогнозирования данной сферы экономики.

Влияние научно-технического прогресса (НТП), либерализации и глобализации экономических отношений на российском рынке услуг инфокоммуникационных услуг и множества других факторов диктует необходимость в создании специфического аппарата прогнозирования развития инфокоммуникаций на основе комплексного подхода, учитывающего специфику производства и потребления в сфере инфокоммуникаций и возможность наиболее полного отражения воздействия факторов на развитие инфокоммуникаций с помощью совокупности различных методов и моделей. Между влияющими на развитие инфокоммуникаций факторами и методами прогнозирования имеется существенная взаимосвязь, представленная на рис. 3.

Рис. 3. Взаимосвязь факторов, влияющих на развитие инфокоммуникаций, и методов его прогнозирования

Комплекс прогнозных величин, полученных в соответствии с информационно-экономическим, логистическим и эволюционным законами, корреляционными зависимостями Джиппа и оценкой пропускной способности технических средств и сетей и отличающихся оптимистическими значениями, сопоставляется с результатами трендового, эконометрического и индексного моделирования и корректируется с учетом изменения важнейших параметров объекта прогнозирования и сценариев развития национальной экономики.

В условиях усиления агрессивности внешней среды и неопределенности поведения потребителей инфокоммуникационных услуг необходим системный подход к моделированию объемов производства услуг, основанный на комбинации экономико-статистических и интуитивных моделей. ***Комплексный подход к прогнозированию развития инфокоммуникаций*** как единой системы взаимодействующих сегментов рынка может быть реализован на базе *модульного принципа построения прогнозных моделей* [15].

Модульный принцип построения прогнозных моделей и наибольшей мере подходит к объекту прогнозирования, имеющему различную структуру, охватывающему производство различных видов услуг в масштабе страны (на региональном, секторальном, видовом уровнях). Назначение прогнозной модели, построенной по модульному принципу, состоит в получении прогноза

доходов инфокоммуникаций по разным векторам развития с учетом изменений прогнозного фона, внутренней структуры объекта, инфляционных процессов (экспертные оценки) путем подбора наиболее адекватных математических зависимостей на основе годовых данных за длительный период времени [6, 22].

Необходимость комплексного подхода при прогнозировании развития инфокоммуникаций определяется такими основополагающими принципами прогнозирования, как:

- системность прогнозов, требующая взаимной увязки и соподчиненности прогнозов различных масштабов и прогнозного фона (внешних условий, существенно влияющих на решение задач прогноза);
- согласованность прогноза различной природы и периода упреждения;
- вариантность прогнозирования (в соответствии с наиболее вероятными сценариями развития и конъюнктуры рынка – прогнозного фона);
- непрерывность прогнозирования, предполагающая корректировку прогнозов по мере поступления новых данных об объекте прогнозирования и изменениях прогнозного фона;
- верифицируемость прогнозирования (определение достоверности, точности и обоснованности прогнозов).

Кроме того, комплексный подход к прогнозированию развития инфокоммуникаций обусловлен природной спецификой объекта прогнозирования, рассмотренной ранее. Прогнозирование развития инфокоммуникаций должно основываться на информационно-экономическом и логистическом законах развития, на закономерности пропорционально-опережающего развития, требуемой скорости передачи и объемов произведенной информации, с учетом достигнутого уровня экономического развития страны и закономерностей НТП в развитии связи и информационных технологий.

Важным методологическим приемом комплексного моделирования развития инфокоммуникаций является использование простых методов экстраполяции динамических рядов с максимальным включением в модель трудно определяемых факторов и с использованием мнения экспертов ведущих специалистов в сфере связи, инфокоммуникационных технологий, инфокоммуникаций.

Методический аппарат комплексной системы прогнозирования развития инфокоммуникаций представляет собой систему аналитических процедур выявления закономерностей, факторов, структурных сдвигов и циклов динамического развития объекта прогнозирования, разработки многопараметрических прогнозных моделей и корректировки трендовых, экономических и индексных моделей с учетом выявленных и количественно определенных закономерностей (рис. 4).

Рис. 4. Методический аппарат многопараметрического прогнозирования развития инфокоммуникаций

Выявленные закономерности научно-технического развития инфокоммуникаций позволяют разработать прогноз с учетом перспективных объемов, скорости, стоимости передачи информации, быстродействия и пропускной способности технических средств, каналов, сетей, прогрессивных технологий, процессов конвергенции и макрогенерации. Информационно-экономический закон характеризует взаимосвязь между размерами производственной информации за год и объемом валового внутреннего продукта.

Прогнозирование развития инфокоммуникаций должно основываться на информационно-экономическом и логистическом законах развития, на закономерности пропорционально-опережающего развития, требуемой скорости передачи и объемов произведенной информации, с учетом

достигнутого уровня экономического развития страны и закономерностей НТП в развитии связи и информационных технологий.

Выявление специфики и факторов развития отрасли инфокоммуникаций показало, что задача прогнозирования отраслевого развития является многопараметрической и комплексной. Для разработки адекватного методического аппарата прогнозирования развития инфокоммуникаций на различные периоды упреждения необходимо учитывать не только закономерности научно-технического, организационно-экономического и социального развития связи, но и инфраструктурную роль инфокоммуникаций, состоящую в тесной взаимосвязи с макроэкономическими факторами и условиями экономического и социального развития.

Учет влияния макроэкономических факторов на динамику физического объема услуг связи, информационных услуг и технологий осуществляется в двух плоскостях. Первая охватывает макроэкономические сценарии и параметры прогноза социально-экономического развития страны, становящиеся для прогнозирования развития инфокоммуникаций либо вариантами и индикаторами, либо ограничениями. В соответствии с экспортной, структурной, инновационной политикой и активностью предпринимательства в прогнозируемом периоде определяются темпы прироста ВВП, уровень инфляции, рост потребительских цен и цен производителей промышленной и других видов продукции, индекс-дефлятор ВВП, в соответствии и с учетом которых осуществляются прогнозы роста инфокоммуникационных услуг по видам и формам.

Оптимизация факторов экономического роста применительно к сфере инфокоммуникаций выражается в опережении темпов прироста объема услуг инфокоммуникационного сектора экономики в *К* раз по сравнению с приростом физического объема ВВП и отставании (замедлении) темпов прироста тарифов на инфокоммуникационные услуги по сравнению с приростом потребительских цен (цен производителей промышленной продукции) и изменением коэффициента дефлятора ВВП, отражающего общее изменение цен на товары и услуги национальной экономии.

Другая плоскость прогнозирования доходов инфокоммуникаций с учетом влияния макроэкономических факторов, выявленных в результате корреляционно-регрессионного анализа, и внутренних факторов инновационно-структурного характера является использование разработанной авторами факторной модели динамики результатов деятельности отрасли инфокоммуникаций от влияния внешних и внутренних факторов, динамика которых выражена в темпах прироста и структурных составляющих экономических параметров [9, с. 147-148].

***Факторная модель*** оценки динамики доходов инфокоммуникаций (в темпах прироста) отражает синергетический эффект положительной динамики и структуры влияния макроэкономических и внутренних факторов:

– макроэкономических факторов: ВВП, среднемесячной заработной платы работников (расходов населения на приобретение товаров и услуг), инвестиций с учетом отраслевой доли в текущем периоде;

– внутренних факторов: доходов от новых инфокоммуникационных услуг (ИКУ), эффекта от более низких темпов роста тарифов на услуги инфокоммуникаций по сравнению с инфляцией, эффекта от развития предпринимательства и новых технологий, систем и средств связи в зависимости от темпов прироста инвестиций.

Факторная модель влияния макроэкономических и внутренних факторов на прирост доходов инфокоммуникаций имеет следующий вид:

$$\Delta I_{Д}^{ИК} = \Delta I_{ИК}^{МЭ} \cdot d_{МЭ} + \Delta I_{ИК}^{ВН} \cdot d_{ВН} = \left(\Delta I_{ВВП} \cdot d_{вкл}^{ИК} + \Delta I_{З} \cdot d_{расх}^{ИК} + \Delta I_{инв} \cdot d_{инв}^{ИК}\right) \cdot d_{МЭ} +$$
$$+\left(\Delta I_{Д_{нов.усл.}}^{ИК} \cdot d_{нов.усл.}^{ИК} + \left(\Delta I_{инф}^{МЭ} - \Delta I_{тар}^{ИК}\right) \cdot \Delta I_{d_{нов.усл.}} + \Delta I_{Д_{тр}}^{ИК} \cdot d_{тр}^{ИК} + \Delta I_{инв}^{ИК} \cdot \Delta d_{циф}\right) \cdot d_{ВН}, \quad (1)$$

где: $\Delta I_{ВВП}$, $\Delta I_{З}$, $\Delta I_{инв}$ – темп прироста ВВП, средней зарплаты работников, инвестиций Российской Федерации за период, (%);

$d_{вкл}^{ИК}$, $d_{расх}^{ИК}$, $d_{инв}^{ИК}$ – доля инфокоммуникаций в ВВП, расходах потребителей, инвестиций в основной капитал (отн. ед.);

$\Delta I_{Д_{нов.усл.}}^{ИК}$, $\Delta I_{Д_{тр}}^{ИК}$, $\Delta I_{инв}^{ИК}$, $\Delta I_{инф}^{МЭ}$, $\Delta I_{тар}^{ИК}$ – темп прироста доходов от новых ИКУ, от традиционных ИКУ, инвестиций отрасли ИК, макроэкономической инфляции, тарифов на ИКУ (%);

$d_{нов.усл.}^{ИК}$, $d_{тр}^{ИК}$, $\Delta I_{d_{нов.усл.}}$, $\Delta d_{циф}$ – доля доходов от новых ИКУ, от традиционных ИКУ, прирост доли доходов от новых услуг, прирост уровня цифровизации сетей связи (отн. ед.);

$d_{МЭ}$, $d_{ВН}$ – значимость (доля влияния) макроэкономических и внутренних факторов (отн. ед).

При прогнозировании развития инфокоммуникаций основополагающим является вопрос о достаточности достигнутого уровня развития инфраструктуры объемам предоставляемых услуг. ***Для оценки достаточности развития инфокоммуникаций*** исследуется взаимосвязь между объемами предложения и потребления инфокоммуникационных услуг, т.е. взаимосвязь между объемами услуг и численности потребителей.

Применение экспоненты для прогнозирования объемов предложения услуг означает неограниченный рост потребителей, что не соответствует жизнеспособности нашей планеты [11, 26]. Экспоненциальный закон может применяться при прогнозировании развития технических систем, в том числе и инфокоммуникаций, только при относительно малых интервалах времени (краткосрочном и среднесрочном прогнозе ввода новых систем, технологий и стандартов). Представленные в [9, с. 164] кривые экспоненциального роста 2 и 3 наиболее близки к реальной жизни, поскольку учитывают жизненный цикл продуктов (услуг) и закон насыщения потребителей и приводят к логистическому закону развития [9, с. 165-166].

Логистический закон определяет развитие явления или процесса во времени с учетом его начала, развития и окончания [11, с. 34-36]. Для оценки влияния НТП на развитие инфокоммуникаций с помощью логистического закона можно использовать жизненный цикл товаров [9, с. 166-167].

Хотя логистический закон часто применяется для моделирования реальных процессов развития, его использование для прогнозирования не является простой математической процедурой, так как весьма трудно определить с высокой степенью точности его параметры, особенно уровень насыщения. Поэтому разработка прогнозов производится по различным сценариям развития, с различными уровнями насыщения на основе дифференциального уравнения с переменными параметрами.

***Для диагностирования процесса макрогенерации в сфере инфокоммуникаций*** целесообразно использовать балансовую модель расходов потребителей на инфокоммуникационные услуги и доходов отрасли от их реализации:

$$\sum P_{потр_i} \cdot N_{потр_i} = \sum q_i \cdot t_{тар_i}, \quad (2)$$

где $P_{потр_i}$ – расходы потребителей на *i*-тую услугу; $N_{потр_i}$ – число пользователей *i*-той услуги; $q_i$ – количество оказанных услуг *i*-го вида; $t_{тар_i}$ – средняя доходная такса (тариф) на *i*-тую услугу за период.

Процесс диагностирования макрогенерации услуг связи и инфокоммуникационных услуг состоит в сопоставлении темпов изменения параметров динамической балансовой модели расходов потребителей и доходов инфокоммуникаций по *i*-тому и *j*-тому виду услуг:

$$\begin{cases} I_{P_{потрi}} \times I_{d_{pi}} \times I_{потрi} = I_{gi} \times I_{gdi} \times I_{тарi} \\ I_{P_{потрj}} \times I_{d_{pj}} \times I_{потрj} = I_{gj} \times I_{dgj} \times I_{тарj} \end{cases} \quad (3)$$

С течением времени, ходом экономического развития страны и отрасли инфокоммуникаций динамика параметров балансовой модели дополняется структурными компонентами: изменением доли расходов пользователей в семейном бюджете на ИКУ и структурными сдвигами в отраслевых доходах по видам услуг. Поэтому момент начала процесса макрогенерации одних услуг по отношению к другим фиксируется изменением тенденций параметров балансовой модели на противоположную. Например, за последние годы снизилось количество телеграмм, их доля в доходах документальной связи, расходы пользователей на телеграфную связь и их число при значительном росте объемов телематических услуг, их структурной доли, а также количества и расходов потребителей на телематику и передачу данных.

## Прогнозные оценки параметров и закономерностей развития инфокоммуникаций

*Оценка тенденций макроэкономического и научно-технического развития инфокоммуникаций.* Выявленные закономерности научно-технического развития инфокоммуникаций позволяют разработать прогноз с учетом перспективных объемов, скорости, стоимости передачи информации, быстродействия и пропускной способности технических средств, каналов, сетей, прогрессивных технологий, процессов конвергенции и макрогенерации.

Информационно-экономический закон характеризует взаимосвязь между размерами производственной информации за год и объемом валового

внутреннего продукта [19]. Величина взаимосвязи определяется коэффициентом $A$, характеризующим средний объем производственной информации, используемой производителями товаров и услуг для получения среднего объема продаж (доходов) по стране (бит на 1 руб.).

Если сделать предположение о постоянстве коэффициента $A$ на протяжении многих лет в будущем, то тогда объем переданной и обработанной средствами инфокоммуникаций информации ($I$) будет увеличиваться прямо пропорционально росту ВВП ($G$) и росту структурной доли ВВП, которая определяется результатами деятельности инфокоммуникаций ($B$), и обратно пропорционально – стоимости единицы информации ($A^{-1}$):

$$I = A^{-1} \cdot B \cdot G \tag{4}$$

В табл. 3 представлены результаты расчетов прогнозных значений ВВП, доходов инфокоммуникаций и объема передаваемой средствами связи информации России на период до 2030 г. (2% прироста ВВП – при негативном прогнозе, 4% – при оптимистическом прогнозе).

Таблица 3 – Прогноз объема передаваемой информации

| Показатели | Варианты прироста ВВП, % | Факт | | | Прогноз | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 2005 г. | 2010 г. | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. |
| ВВП ($G$), трлн. руб. | 2 | 21,6 | 45,1 | 81,5 | 115,2 | 240,0 |
| | 4 | 21,6 | 45,1 | 81,5 | 135,7 | 300,0 |
| Доля ВВП за счет инфокоммуникаций, % | - | 7,6 | 4,4 | 3,8 | 4,0 | 4,4 |
| Объем информации ($J$), бит | 2 | $6{,}5 \cdot 10^{17}$ | $1{,}6 \cdot 10^{18}$ | $3{,}7 \cdot 10^{18}$ | $6{,}3 \cdot 10^{18}$ | $8{,}0 \cdot 10^{18}$ |
| | 4 | $6{,}5 \cdot 10^{17}$ | $1{,}6 \cdot 10^{18}$ | $3{,}7 \cdot 10^{18}$ | $6{,}5 \cdot 10^{18}$ | $8{,}3 \cdot 10^{18}$ |
| Доходы инфокоммуникаций ($B \cdot G$), трлн. руб. | 2 | 1,0 | 2,0 | 2,8 | 4,4 | 10,2 |
| | 4 | 1,0 | 2,0 | 2,8 | 5,2 | 13,7 |

Результаты расчетов показывают, что при сохранении стоимости 1 бит информации на постоянном уровне ($1{,}5 \cdot 10^{-6}$) каждые пять лет объем производственной информации увеличивается в 2 и более раз. Поскольку стоимость единицы информации снижается по мере снижения тарифов на инфокоммуникационные базовые и традиционные услуги, то следует ориентироваться на более высокие темпы роста передаваемой производственной информации.

Поскольку информационно-экономический закон характеризует соотношение между производственной информацией и ВВП на момент времени (конец отчетного года), то последовательность дискретных значений $G_t = A \cdot I_t$ (где $t$ – годы), будет определять этот закон в виде дискретной последовательности во времени, что позволяет прогнозировать развитие инфокоммуникаций во времени на долгосрочный период.

Хотя информационно-экономический закон свидетельствует о пропорциональной зависимости между объемом производственной информации и ВВП, но в явном виде не отражает величину требуемой пропускной способности инфокоммуникационного комплекса. В [19]

Л.Е. Варакин на основе рассмотрения квазистационарного развития экономики показал, что если ВВП ($G$) растет со скоростью, пропорциональной достигнутому уровню в предыдущем году ($\alpha$ – скорость прироста в относительном выражении), то величина ВВП в прогнозируемом $t$-году $G_t$ составит

$$G_t = G_0(1+\alpha)t\,, \tag{5}$$

где $G_0$ – объем ВВП в базисном периоде; $t$ – период упреждения в годах.

Поскольку скорость роста α<1, то аппроксимацией данной зависимости является экспонента с различными формами экспоненциального роста. Кроме того, экономическая динамика отличается цикличностью подъемов и спадов экономики [4, 27], которые необходимо учитывать при прогнозировании объемов передачи производственной информации и пропускной способности инфокоммуникаций.

Пропускная способность инфокоммуникаций в конце $t$-го года $C_t$ должна быть не меньше значения, определяемого информационным потоком в $t$+1 году, т.е.

$$C_t = BI_{t+1} = ABG_{t+1} = (1+\alpha)ABG_t\,, \tag{6}$$

где $B$ – нормирующая постоянная, характеризующая долю ВВП, обусловленную деятельностью инфокоммуникаций.

Соотношение (6) определяет закономерность пропорционально-опережающего развития инфокоммуникаций по сравнению с ростом экономики (ВВП) [19]. Опережение определяется коэффициентом 1+$\alpha$, т.е. требуемым запасом примерно на год вперед. Итак, если не учитывать требования опережающего роста инфокоммуникаций, то в случае подъема экономики ИК будут сдерживать этот рост. С другой стороны, нельзя развивать их чрезмерно быстро по сравнению с ростом ВВП, так как в этом случае объем информационных потоков не будет соответствовать пропускной способности ИК и произойдет недоиспользование основных производственных мощностей инфокоммуникационного комплекса.

***В целях прогнозирования объемов создаваемой и передаваемой производственной информации на основе пропускной способности*** инфокоммуникационного оборудования, сетей и технических средств важно определить на перспективный период величины среднегодового прироста абонентской базы терминалов связи и персональных компьютеров (или интегрированных терминалов), скорости передачи информации и производительности электронно-вычислительной техники. Среднее время работы усредненного терминала можно принять равным 30 мин. в сутки, среднюю скорость передачи информации – равной 8 Кбит/с, которая соответствует высокому качеству речи [11, с. 176].

Возможный объем сообщений, который может поступить на вход телекоммуникационной сети за время Т зависит от рассматриваемого интервала времени. Разброс между величинами нагрузки в час наибольшей нагрузки (ЧНН) и в период спада активности пользователей превышает десятки раз. Из экономических соображений емкость сети и ее предельная пропускная

способность выбираются в несколько меньших объемах, то есть устанавливаются нормы потерь передачи информации в целях экономии оборудования [11, с. 207-210]. Число поступающих вызовов в ЧНН зависит от числа активных источников сообщений, т.е. объем передаваемой средствами связи информации в сутки будет определяться по формуле:

$$V_{СУТ} = \rho N_{аб} \nu T_{сут}, \quad (7)$$

где ρ – коэффициент, определяющий число работающих источников сообщений в ЧНН. Его средняя величина в течение суток равна примерно 0,1.

Поскольку производственная информация передается по каналам связи, то пропускная способность сети связи часто оценивается числом каналов, имеющих ту или иную стандартную скорость. На единой сети электросвязи (ЕСЭ) РФ таким стандартным каналом принят основной цифровой канал (ОЦК) со скоростью 64 Кбит/с [11, 26]. Поэтому пропускная способность ЕСЭ РФ, необходимая для пропуска трафика, эквивалентного объему передаваемой информации за сутки, выражается числом ОЦК:

$$N_{ОЦК} = \frac{0{,}1 N_{аб} \nu T_{СУТ}}{64 \cdot 10^3 \cdot 3600}. \quad (8)$$

В табл. 4 приведено расчетное число основных цифровых каналов на прогнозный период в предположении, что объем информации растет в 10 раз каждые 5 лет.

Таблица 4 – Прогноз числа основных цифровых каналов на ЕСЭ РФ

| Параметр | 2005 г. | 2010 г. | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. |
|---|---|---|---|---|---|
| Объем информации в год (бит) | $10^{18}$ | $10^{19}$ | $10^{20}$ | $10^{21}$ | $10^{22}$ |
| Число ОЦК | $1{,}2 \cdot 10^7$ | $1{,}2 \cdot 10^8$ | $1{,}2 \cdot 10^9$ | $1{,}2 \cdot 10^{10}$ | $1{,}2\ 10^{11}$ |

Аналогичная картина наблюдается в эволюции волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). Предельные возможности ВОЛС к 2020 году [26] определяются следующими характеристиками: предельная скорость передачи информации по сети Интернет составит 2 бит/с на 1 Гц; по ВОЛС – 10 бит/с на 1 Гц. При ширине оптического окна в 150 нм=18750 ГГц и разносе каналов 25 ГГц количество каналов составит 750 единиц. Суммарная скорость передачи информации при ширине канала 10 ГГц будет равна 75000 Гбит/с [11, с. 209-210]. Применение новой технологии спектрального уплотнения HDWDM позволяет в десятки раз повысить пропускную способность волоконно-оптических линий и соответственно снизить удельную стоимость передачи информации (бит/с) [9, с. 177-178].

Исходя из эволюции развития микропроцессорной техники, а именно научно-технической и экономической закономерности роста объема памяти основного запоминающего устройства (ОЗУ) в одном кристалле, числа транзисторов в микросхеме, снижения их стоимости и роста объемов создаваемой и обрабатываемой на компьютерной технике информации можно оценить на перспективу объемы информационной составляющей

производственной информации и масштабы распространения ПК, ноутбуков (табл. 5).

Таблица 5 – Прогноз числа персональных компьютеров и объемов обрабатываемой производственной информации до 2030 г.

| Показатели | 2010 г. | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. |
|---|---|---|---|---|
| Объем памяти ОЗУ в одном кристалле, Гбит | 100 | 800 | 9 000 | 20 000 |
| Число транзисторов в микросхеме, млн. ед. | 90 | 1400 | 20 000 | 50 000 |
| Темп роста производительности ПК, отн. ед. | 10 раз | 10 раз | 10 раз | 10 раз |
| Стоимость 1 мил. транзисторов в микросхеме, руб. | 1,2 | 0,12 | 0,01 | 0,001 |
| Объем обрабатываемой ПК информации, бит | $30 \cdot 10^{18}$ | $38 \cdot 10^{19}$ | $48 \cdot 10^{20}$ | $58 \cdot 10^{20}$ |
| Темпы роста информационной составляющей информации, отн. ед. | 12 раз | 12 раз | 12 раз | 12 раз |
| Количество ПК, млн. ед. | 62 | 99 | 120 | 135 |
| Темп роста числа ПК, отн. ед. | 3,4 | 1,6 | 1,2 | 1,1 |

Расчеты показывают, что возможности обработки созданной с помощью информационных технологий информации, увеличивающейся каждые пять лет в 12 раз, реализуются прогрессом объема памяти оперативных запоминающих устройств, уменьшением размера транзисторов, ростом удельной производительности ПК, а также снижением удельной стоимости транзисторов, находящихся в одной микросхеме. Поэтому динамика числа персональных компьютеров для обработки производственной информации имеет замедляющийся характер, соответствующий темпам насыщения пользователей.

На рис. 5 представлен прогноз объемов передаваемой информации до 2020 г. исходя из темпов роста ВВП (определяющих минимальный объем), развития связи и НТП (максимальный объем) [11, 26].

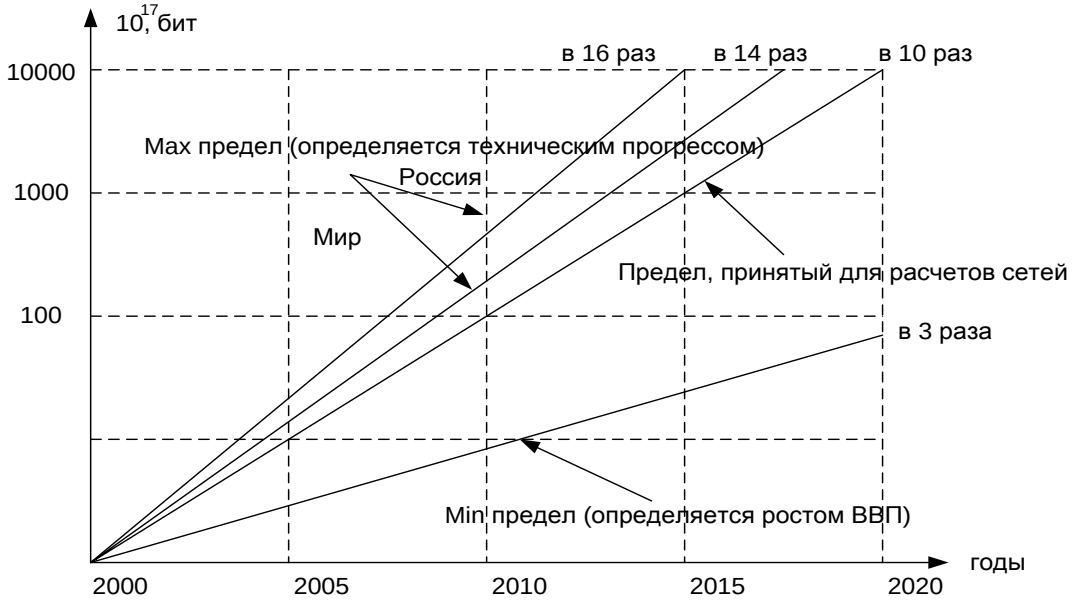



Рис. 5. Прогноз роста объемов передаваемой информации

Если сравнить рост объема информации за счет НТП (16 раз) за 5 лет, с тем, который получается за счет роста ВВП (3 раза), то можно их принять за верхний и нижний предел соответственно. В качестве среднего прогнозного темпа роста целесообразно принять 10 кратный рост объема информации за 5 лет. Этот прогноз подтверждается ростом нетелефонного международного трафика за пятилетний период более, чем в 11 раз, а числа обращений в сети Интернет (WWW страницам) – в 26 раз.

***Прогнозирование интенсивности потребления*** технических средств доступа к сетям связи, информационным сетью и ресурсам, т.е. плотности терминалов фиксированной и подвижной электросвязи, компьютерной плотности, плотности пользователей сетью Интернет, базируется на статистических зависимостях между спросом и факторами потребления, выражаемых корреляционными зависимостями Джиппа, логистическим законом поведения товаров и услуг на рынке в течение его «срока жизни», функциями платежеспособности потребителей.

Для отражения статистической зависимости между экономическим развитием страны и спросом на терминалы связи и ПК, выражаемом в виде инфокоммуникационной плотности (числа телефонных аппаратов, терминалов подвижной связи, персональных компьютеров и пользователей сетью Интернет на 100 чел. населения), используется корреляционная зависимость между душевым валовым внутренним продуктом (ДВВП) в стране и инфокоммуникационной плотностью (телефонной, компьютерной) – диаграмма Джиппа вида:

$$y_x = a_0 + a_1 \cdot x, \tag{9}$$

где $y_x$ – плотность ОТА (основных телефонных аппаратов фиксированной связи), ТПС (терминалов подвижной связи), ПСИ (пользователей сетью Интернет), ПК (персональных компьютеров) на 100 чел. населения; $x$ – душевой валовой внутренний продукт (тыс. руб. а 1 чел.).

Для отражения динамики изменения душевого валового внутреннего продукта во времени модель 9 преобразуется в уравнение авторегрессии:

$$y_{xt} = a_0 + a_1 \cdot \left(b_0 + b_1 \cdot t + b_2 t^2 + b_3 t^3\right) \tag{10}$$

где $t$ – параметр времени, отражающий изменение ДВВП.

Аналитическое выравнивание фактических данных о ДВВП за период 2001 – 2010 гг. позволило получить наиболее достоверно отражающую тренд ДВВП от времени аппроксимирующую функцию полинома третьей степени для прогноз ДВВП на 2030 г. [9, с. 180]:

$$x_t^2 = 13{,}173 + 14{,}912 \cdot t + 0{,}4166 \cdot t^2 + 0{,}0408 \cdot t^3 \left(R^2 = 0{,}9995\right), \tag{11}$$

Еще более точные результаты по величине коэффициента детерминации ($R^2$), показывающего долю вариации результативного признака за счет вариации факторного признака, дает прогнозирование инфокоммуникационной плотности в зависимости от ДВВП на основе полиномов третьей и пятой степени:

$$Y_{OTA} = 22{,}785 - 0{,}5813 \cdot x + 0{,}2762 \cdot x^2 - 0{,}0066 \cdot x^3 \ \left(R^2 = 0{,}999\right);$$

$$Y_{ПИ} = 0,8861 - 1,0071 \cdot x + 0,6093 \cdot x^2 - 0,0174 \cdot x^3 \ (R^2 = 0,994);$$
$$Y_{ПК} = 9,9916 - 3,5332 \cdot x + 0,7408 \cdot x^2 - 0,0193 \cdot x^3 \ (R^2 = 0,996);$$
$$Y_{ПС} = 38,441 - 47,383 \cdot x + 15,802 \cdot x^2 - 1,601 \cdot x^3 + 0,069 \cdot x^4 - 0,001 \cdot x^5$$
$$(R^2 = 0,996). \quad (12)$$

Результаты построения корреляционных зависимостей инфокоммуникационной плотности по статистическим данным Минкомсвязи России за период 2001-2010 годы от тренда душевого валового внутреннего продукта и прогноза инфокоммуникационной плотности в разрезе телефонных аппаратов фиксированной связи (ОТА), терминалов или sim-карт подвижной связи (ПС), пользователей сети Интернет (ПИ) и персональных компьютеров и ноутбуков (ПК), на период до 2030 г. представлены в табл. 6.

Характерным для параметров параболы разных степеней являются отрицательный коэффициент регрессии при первом x, что свидетельствует о замедляющейся тенденции к росту плотности инфокоммуникационных средств и о наступлении насыщения рынка инфокоммуникационных средств доступа к сети связи и Интернет (рис. 6).

Таблица 6 – Прогноз инфокоммуникационной плотности в зависимости от душевого валового внутреннего продукта РФ до 2030 г.

| Плотность на 100 чел. | Линейное уравнение регрессии | Коэф. детерм. | Факт | | Прогноз | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 2010 г. | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. |
| Телефонные аппараты фиксированной связи | $Y_{ОТА} = 22,293 - 0,005 \cdot x_t$ | 0,87 | 31,4 | 29,1 | 28,2 | 25,0 |
| Терминалы подвижной связи | $Y_{ПС} = 41,04 + 0,016 \cdot x_t$ | 0,69 | 166,4 | 195,8 | 201,0 | 210,0 |
| Пользователи сети Интернет | $Y_{ПИ} = 4,084 + 0,105 \cdot x_t$ | 0,83 | 46,8 | 66,2 | 80,0 | 90,0 |
| Персональные компьютеры | $Y_{ПК} = 4,062 + 0,099 \cdot x_t$ | 0,85 | 43,6 | 69,1 | 83,0 | 94,0 |

В сфере связи к услугам, находящимся в стадии рыночного насыщения, относятся не только письменная корреспонденция (срок жизни – более трех столетий), телеграфные сообщение (более 150 лет), телефонные соединения со стационарных телефонных аппаратов (более 100 лет), но и телефонные соединения подвижной связи (более 30 лет). Следует учитывать, что появление новых услуг и средств связи не сразу и не полностью заменяет традиционные (старые) услуги. Так при снижении объемов письменной корреспонденции за последние 20 лет на порядок структура письменных сообщений претерпела кардинальные сдвиги, а именно, в совокупности писем стали превалировать не частные, а деловые письма с документами, извещениями, напоминаниями и т.д. При чрезвычайно высоком спросе на мобильные телефоны сохраняется неудовлетворенный спрос на фиксированную телефонную связь, что обуславливает дальнейшее развитие местной телефонной связи.

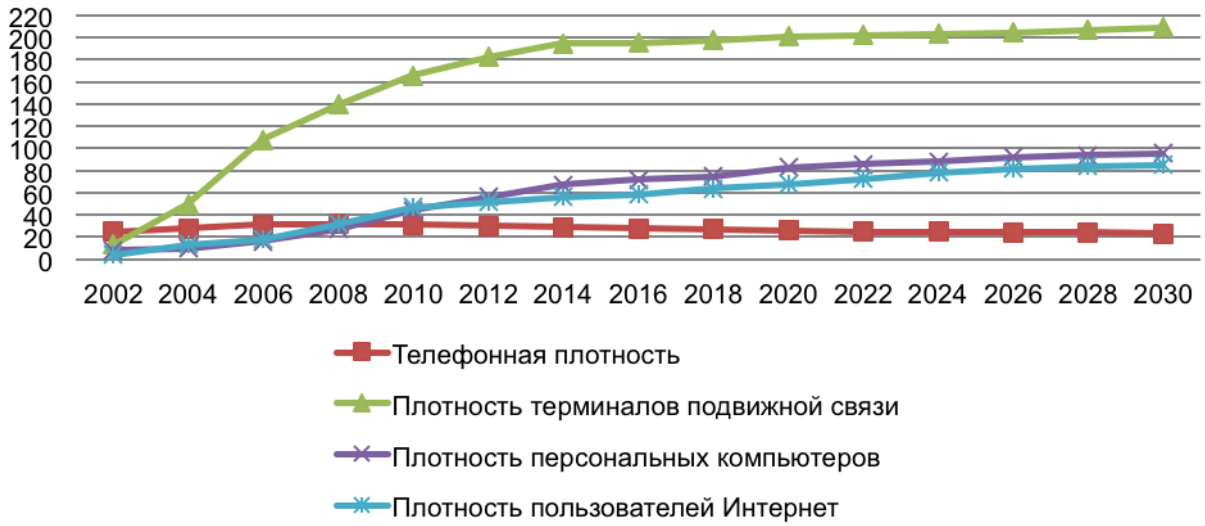



Рис. 6. Динамика и прогноз инфокоммуникационной плотности до 2030 г.

Поэтому прогнозирование интенсивности потребления инфокоммуникационных услуг и средств предполагает комплексный подход, основанный ***на учете факторов спроса*** (экономических, психологических, физиологических) при построении моделей зависимости Джиппа и насыщения потребления.

Платежеспособность населения и его доходы являются одним из главнейших факторов, определяющих спрос на услуги инфокоммуникаций [28, 29]. Долгосрочная стратегия инновационного развития России, в первую очередь, предусматривает рост благосостояния россиян, формирование среднего класса, материальную поддержку молодых семей, сокращение бедности и разрыва между доходами крайних групп населения. Это приведет к более равномерному распределению доходов населения, снижению разрыва между доходами крайних групп населения, ранжированных по доходам, с 14 до 10 раз и коэффициента концентрации доходов Джини до 20%.

Для сферы инфокоммуникаций рост благосостояния населения и экономический рост страны ведут к увеличению доли расходов пользователей в семейном бюджете на инфокоммуникационные услуги (ИКУ), что означает рост доходов отрасли.

Для прогноза расходов россиян на инфокоммуникационные услуги нами была разработана модифицированная корреляционно-регрессионная модель зависимости величины удельных расходов пользователей от душевого валового внутреннего продукта, доли доходов инфокоммуникаций в ВВП и доли расходов на услуги инфокоммуникаций в бюджете граждан России:

$$y_t^{ИК} = a_0 + a_1 \cdot q_t^{ВВП} + a_2 \cdot d_t^{ВВП} + a_3 \cdot d_t^{ИК}, \quad (13)$$

где $t$ – параметр времени в годах, выражаемый числами, начиная с базисного года; $y_t^{ИК}$, $q_t^{ВВП}$, $d_t^{ВВП}$, $d_t^{ИК}$ – удельные расходы пользователей на инфокоммуникационные услуги, ДВВП, доля доходов инфокоммуникаций в

ВВП, доля расходов на инфокоммуникации в семейном бюджете в планируемом *t* году.

Математическое выражение зависимости удельных расходов пользователей на инфокоммуникации от ДВВП, вклада инфокоммуникаций в ВВП, доли расходов пользователей в семейном бюджете на инфокоммуникации по данным за 2001-2012 годы имеет вид:

$$y_t^{ИК} = 0,7 + 0,043 \cdot q_t^{ВВП} + 9,26 \cdot d_t^{ВВП} - 2,8 \cdot d_t^{ИК}. \quad (14)$$

Теснота связи между анализируемыми показателями высокая ($R^2$ =0,991), коэффициент детерминации равен 0,998, ошибка аппроксимации при значимости α=0,01 составляет 2,02%.

Экономический смысл полученной модели состоит в том, что рост благосостояния людей и спектра инфокоммуникационных услуг (ИКУ) ведут к росту удельных затрат семейного бюджета на данные услуги. Увеличение доли расходов на ИКУ в структуре семейного бюджета способствует его перераспределению в сторону технологичных услуг и товаров. Прогноз удельных расходов населения России на инфокоммуникационные услуги на период до 2030 года представлен в табл. 7.

В прогнозном периоде удельные расходы потребителей на инфокоммуникационные услуги или доходы отрасли ИК растут более высокими темпами (3,86 раз), чем душевой ВВП (3,66 раз), за счет положительной структурной динамики развития отрасли, что подтверждает действие закона пропорционально опережающего развития инфокоммуникаций по сравнению с динамикой экономического развития страны.

***Для прогноза числа потребителей по различным видам услуг и средств инфокоммуникаций*** следует использовать методы аналитического выравнивания с учетом логистического закона развития:

$$\hat{y}_t = \frac{1}{a + b \cdot c^t}. \quad (15)$$

Параметры логистической кривой можно определять по достигнутому в развитых странах уровню. Анализ потенциальных величин инфокоммуникационного развития по развитым и высокоразвитым странам [30-31] показывает, что в качестве прогнозного уровня телефонной плотности в 2030 г. по фиксированной связи можно принять 25-30 ОТА на 100 чел. В то же время плотность терминалов подвижной связи может находиться в пределах 170-210 ед. на 100 чел. за счет применения интегрированных терминалов с мобильным доступом в Интернет. Плотность персональных компьютеров в соответствии с психологической и экономической целесообразностью, развитием цифрового телевидения и интеграций терминалов связи и информатики имеет также характер экспоненциального роста с насыщением, определяемым уровнем компьютерной плотности в 80-100 интегрированных терминалов на 100 чел. Эта же величина может быть ориентиром и для плотности пользователей сети Интернет.

Таблица 7 – Прогноз удельных расходов пользователей на инфокоммуникационные услуги до 2030г.

| Показатели | Факт | | Прогноз | | Темпы изменения за 2015 – 2030 гг., % |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2010 г. | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. | |
| 1. Душевой ВВП, тыс. руб. на 1 чел. | 275,1 | 567,8 | 944,4 | 2079,5 | 366,2 |
| 2. Доля расходов на ИКУ в бюджете семьи, % | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | +0,2 |
| 3. Доля доходов ИК в ВВП, % | 4,41 | 3,79 | 3,80 | 4,43 | +6,4 |
| 4. Удельные расходы пользователей на ИКУ, тыс. руб. на 1 чел. | 10,5 | 22,1 | 37,8 | 85,3 | 385,5 |

Результаты прогнозирования объемов абонентского оборудования фиксированной и подвижной связи, персональных компьютеров и пользователей сети Интернет, представленные в табл. 8, на основе логистических кривых свидетельствуют о достаточной степени аппроксимации полученных моделей по величине коэффициента детерминации.

Таблица 8 – Прогноз объемов инфокоммуникационного абонентского оборудования и пользователей Интернет до 2030 г., млн. ед.

| Показатели | Формула логистической кривой | Коэф. детерм. | Факт | | Прогноз | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 2010 г. | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. |
| 1.Число телефонных аппаратов фиксированной связи | $\hat{y}_t = \frac{1}{-0,004 - 0,038 \cdot 0,95^t}$ | 0,974 | 44,7 | 38 | 35 | 31 |
| 2.Число ПК | $\hat{y}_t = \frac{1}{0,002 + 0,144 \cdot 0,86^t}$ | 0,936 | 62,0 | 99 | 120 | 135 |
| 3.Число терминалов подвижной связи | $\hat{y}_t = \frac{1}{0,005 + 1,594 \cdot 0,42^t}$ | 0,971 | 237,8 | 290 | 300 | 310 |
| 4.Количество пользователей Интернет | $\hat{y}_t = \frac{1}{0,009 + 0,81 \cdot 0,64^t}$ | 0,964 | 56,0 | 95 | 115 | 130 |

Прогнозирование развития инфокоммуникаций на основе логистического закона имеет большое практическое значение, так как позволяет оценить пределы телефонизации компьютеризации и информатизации страны и возможные сроки их реализации. Однако последнее справедливо только при наличии достаточных инвестиций, которые зависят от ВВП страны и темпов его изменения в течение определенного интервала времени.

## Обоснование трендовых моделей развития инфокоммуникаций с учетом экономической конъюнктуры

Современная экономическая теория различает понятия экономического роста и развития. К росту принято относить увеличение количественных (объемных) показателей экономики. Под развитием понимается увеличение объемных показателей, достигаемое на основе качественных изменений экономической деятельности – путем улучшения структуры производства с управления, перехода к использованию в производстве новой техники и нанотехнологий, информационных ресурсов и профессионального роста кадров, а также путем совершенствования структуры потребления производственных товаров и услуг.

С этих точек зрения разработка прогноза социально-экономического развития отрасли инфокоммуникаций должна оценивать перспективу роста объемов услуг на основе тренда динамики развития с учетом качественных изменений в сфере производства инфокоммуникационных услуг и технологий. В то же время следует учитывать действие больших циклов экономической динамики, характер формирования стратегии развития и социально-экономических пропорций страны, динамику внешних и внутренних факторов роста ВВП, от которого во многом зависят объемы спроса и потребления инфокоммуникационных услуг.

Теория больших циклов экономической динамики была разработана известным отечественным ученым Н.Д. Кондратьевым [4]. Для обоснования циклов хозяйственной конъюнктуры Н.Д. Кондратьев исследовал статистические данные по четырем ведущим капиталистическим странам – Англии, Франции, Германии, США (динамика цен, процента на капитал, заработной платы, объема внешней торговли, а также производства основных видов продукции промышленности) и обнаружил хорошо выраженные циклы экономической динамики длиной 48–55 лет [4, с. 193]. Кондратьевым Н.Д. было сделано важное наблюдение относительно характера этих циклов: в начале повышательной волны каждого длинного экономического цикла наблюдаются глубокие изменения в условиях экономической жизни общества, вызванных значительными техническими открытиями и изобретениями.

Главную роль в экономических циклах Кондратьев отводил научно-техническим новациям. В развитии первой повышательной волны (конец XVIII в.) решающую роль сыграли изобретения и сдвиги в текстильной промышленности и производстве чугуна. Рост в период второй волны (середина XIX в.) был обусловлен прежде всего строительством железных дорог, развитием морского транспорта. Третья повышательная волна (конец XIX – начало XX в.) была связана с изобретениями в сфере электроники и массовым внедрением электричества, радио и других новшеств. Если продолжить исследовать Н.Д. Кондратьева и проследить волнообразность процессов, можно вычислить, что российская экономика с 1980 г. оказалась в понижательной волне, а с 1998 г – в повышательной волне. Именно в конце XX века в мире происходит большинство технико-технологических, медицинских, промышленных и экологических открытий. К числу

инновационных открытий данного периода относятся многочисленные компьютерные и телекоммуникационные достижения. К их числу принадлежат такие новинки, как Интернет, IP-телефония, технологии беспроводного и широкополосного доступа, цифровое телевидение.

Инновации переводят хозяйственную конъюнктуру с понижательной на повышательную тенденцию, вызывая волнообразование. Таким образом, при разработке долгосрочного прогноза развития экономической системы и ее компонентов необходимо учитывать характер НТП.

Учет волнового типа экономического развития реализуется с помощью сценарного подхода к формированию прогнозов социально-экономического развития страны и соответствующей корректировки трендов отраслевого развития. При этом развитие инфокоммуникаций происходит на основе закона пропорционально-опережающего их развития по сравнению с экономическим ростом страны. В зависимости от сценариев перспективного развития российской экономики возможны и различные прогнозные результаты деятельности инфокоммуникационного сектора.

Проведенный анализ состояния и развития отрасли инфокоммуникаций за период 2001–2015 годы указал на определенные закономерности: во-первых, высокий динамизм отраслевого развития, обусловленный масштабным ростом новых операторов и новых услуг; во-вторых, значительные структурные сдвиги в результатах деятельности по формам собственности и инновационному характеру услуг и технологий; в-третьих, тенденция постоянного снижения тарифов на услуги связи с 10 до 3%, несмотря на инфляцию в стране [9].

Весьма стабильные темпы роста доходов отрасли инфокоммуникаций и ее сегментов (связь, ИТ) за длительный период времени дают основание разрабатывать модели трендов для отражения динамики развития с помощью метода экстраполяции и использовать результаты трендового моделирования для средне и долгосрочного прогнозирования.

В ходе аппроксимации данных о доходах отрасли и ее составляющих с помощью стандартного пакета STATISTICA были получены модели трендов по разным функциям [3, 16]. Исходя из размера коэффициента детерминации, объясняющего вариацию результативного показателя от параметра времени, для прогнозирования доходов от услуг связи, сектора информационных технологий и доходов отрасли инфокоммуникаций в наибольшей степени подходят полиномы высоких степеней. Степенная и экспоненциальная функции не учитывают макроэкономической динамики и развития «большими волнами» и базируются на стабильных темпах роста и прироста, приемлемых для кратко и среднесрочных прогнозов.

Кроме того, были проанализированы темпы прироста отраслевых доходов и произведено выравнивание приростных показателей по различным функциям, также указавшим на наилучшую достоверность прогнозов доходов инфокоммуникаций с помощью параболы второго порядка:

$$\Delta y = 41,5 - 0,2t - 0,2t^2 \; (R = 0,77). \qquad (16)$$

Результаты выравнивания приростной динамики доходов инфокоммуникаций указывают на отрицательность коэффициента регрессии при параметре

времени $t$, что означает снижающуюся тенденцию прироста доходов вследствие насыщения уровня потребления ИКУ и техническими средствами связи и информационных технологий.

Поэтому *для среднесрочного прогнозирования доходов инфокоммуникаций* нами предлагается использовать параболу вида

$$y = 10{,}198 - 8{,}91 \cdot t + 13{,}28 \cdot t^2, (R^2 = 0{,}9973), \quad (17)$$

объясняющую вариацию результатов деятельности отрасли $y$ на 99,73%.

Для формирования моделей *трендов развития инфокоммуникаций на долгосрочную перспективу* в зависимости от параметра времени $t$ нами был произведен подбор наилучших аппроксимирующих функций, представленных в табл. 9.

Таблица 9 – Результаты моделирования трендов доходов инфокоммуникаций на период до 2030 года

| Модель и коэффициент детерминации | Уравнение тренда доходов, млрд. руб. | | |
|---|---|---|---|
| | сектора связи | сектора ИТ | отрасли инфокоммуникаций |
| Степенная $R^2$ | $y_t = 35{,}985 \cdot t^{1{,}7}$ $R^2 = 0{,}9211$ | $y_t = 16{,}972 \cdot t^{1{,}75}$ $R^2 = 0{,}905$ | $y_t = 52{,}895 \cdot t^{1{,}72}$ $R^2 = 0{,}9169$ |
| Экспоненциальная $R^2$ | $y_t = 117{,}14 \cdot e^{0{,}223t}$ $R^2 = 0{,}9897$ | $y_t = 56{,}04 \cdot e^{0{,}232t}$ $R^2 = 0{,}9887$ | $y_t = 173{,}19 \cdot e^{0{,}226t}$ $R^2 = 0{,}9908$ |
| Полином 2-ой степени $R^2$ | $y_t = 1495{,}4 - 531{,}25t + +46{,}45t^2$ $R^2 = 0{,}9748$ | $y_t = 495{,}8 - 202{,}75t + +21{,}5t^2$ $R^2 = 0{,}9953$ | $y_t = 1991{,}2 - 734t + +67{,}95t^2$ $R^2 = 0{,}987$ |
| Полином 3-ой степени $R^2$ | $y_t = -549{,}5 + 430{,}45t - -55{,}8t^2 + 2{,}96t^3$ $R^2 = 0{,}9982$ | $y_t = 236{,}9 - 80{,}98t + +8{,}55t^2 + 0{,}375t^3$ $R^2 = 0{,}9966$ | $y_t = -312{,}6 + 349{,}5t - -47{,}25t^2 + 3{,}34t^3$ $R^2 = 0{,}9998$ |

Из табл. 9 видно, что наибольшую адекватность прогнозу развития отрасли инфокоммуникаций и ее составляющих по коэффициенту детерминации имеет полиноминальная функция 3-ей степени, отражающая рост доходов с учетом насыщения потребителей услугами ИК.

Для разработки средне- и долгосрочных прогнозов социально-экономического развития Российской Федерации, как правило, используется сценарный подход с двумя-тремя вариантами сценариев развития нашей страны. Минэкономразвития России разрабатывает проект или концепцию среднесрочного и долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации. Так разработка долгосрочного прогноза социально-экономического развития РФ до 2020 года базировалась на трех сценариях, до 2030 года – на двух сценариях социально-экономического развития.

***Разработка сценариев социально-экономического развития РФ на 2030 год*** [29] основывалась на реальных тенденциях отечественного и мирового

развития, нарастания процесса больших экономических циклов и возможностях страны по реализации стратегии развития, направленной на решение социальных задач, сбережение и рациональное потребление природных ресурсов, формирование устойчивого сбалансированного роста и информационного общества (рис. 7).

Рис. 7. Тенденции и ключевые факторы социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года

Основные позиции долгосрочного прогноза социально-экономического развития России исходят из достаточно позитивных темпов развития мировой экономики. Динамика прироста мирового валового продукта в 2012-2030 гг. оценивается на уровне 3,4%, (хотя он ниже среднего темпа прироста за 2001-2008 гг. (4%), но соответствует динамике экономического роста за 1980-2010 гг.) [29, с. 11-15]. Нарастание мировых демографических и природных ограничений, а также требований к финансовой сбалансированности мировой экономики препятствует обеспечению высоких докризисных темпов экономического роста.

*На долгосрочный период до 2030 года* прогноз социально-экономического развития РФ предусматривает ***два основных сценария: инновационный (умеренно-оптимистический) и консервативный энерго-сырьевого развития***.

*Инновационный сценарий* характеризуется усилением инвестиционной направленности экономического роста и укреплением позиций России в мировой экономике за счет создания современной транспортной инфраструктуры и конкурентоспособного сектора высокотехнологичных производств и экономики знаний наряду с модернизацией энерго-сырьевого комплекса. Данный сценарий предполагает превращение инновационных факторов в ведущий источник экономического роста и прорыв в повышении эффективности человеческого капитала, что позволяет улучшить социальные параметры развития страны.

Темпы прироста ВВП повысятся до 4,4% в год, доля РФ в мировой экономике повысится с 3% в 2010 г. до 3,5% к 2020 г. и до 3,7% – к 2030 г. Доля расходов (частные и государственные) на здравоохранение повысится с 4,6% ВВП в 2010 г. до 5,9% – в 2020 г. и до 7,1% к 2030 г. (соответственно на образование с 5,2% ВВП до 6,3% и 7,0%; на науку – с 1,2% ВВП до 3%). Такие темпы экономического роста позволят обеспечить рост доли среднего класса с 22% в 2010 г. до 48% в 2030 г.

Данный сценарий опирается на использовании конкурентных преимуществ российской экономики не только в традиционных секторах (энергетика, транспорт, аграрный сектор), но и в новых наукоемких секторах и экономике знаний (информациональной экономике). Переход к инновационному социально-ориентированному развитию предусматривает глубокую модернизацию инновационной системы и ее проникновение в региональную экономику, социальной (образование, здравоохранение, жилищный сектор) и производственной инфраструктуры (транспорта, инфокоммуникаций), развитие много векторной модели интеграции в мировой рынок, диверсификацию российского экспорта в направлении роста доли авиационной и космической техники, судостроения, ядерных технологий, программного обеспечения, услуг космической связи, навигации и геоинформационного обеспечения.

*Консервативный сценарий или вариант консервативного энерго-сырьевого развития* характеризуется умеренными (не более 3,6%) темпами роста экономики на основе активной модернизации топливно-энергетического и сырьевого секторов российской экономики при сохранении относительного отставания в гражданских высокотехнологических секторах. Расходы на здравоохранение, образование и науку стабилизируются на уровне, соответственно 6%, 5% и 2%. Модернизация экономики ориентируется в основном на импортные технологии и знания.

В этом сценарии развития увеличивается разработка новых месторождений полезных ископаемых, повышается их эффективность за счет внедрения новых технологий, уровень добычи и экспорта углеводородов, диверсифицируются направления их экспорта (в том числе Китай) и создается соответствующая инфраструктура, развивается транспортная инфраструктура для реализации транзитного потенциала экономики, инновационная деятельность концентрируется преимущественно на энергетике, топливных и

сырьевых отраслях при низком уровне инновационной активности высокотехнологичных секторов и сохранении высоких темпов импорта.

***Для отрасли инфокоммуникаций*** характерными чертами инновационного сценария прогноза развития на период до 2030 г. являются продолжение развития инфокоммуникационной инфраструктуры информационного общества, широкополосного доступа к информационным ресурсам и международной сети Интернет, формирование электронного правительства и других государственных институтов, масштабное использование ИКТ во всех сферах экономики, осуществление торговых, финансовых, банковских и других операций в электронной среде.

В табл. 11 приведены среднегодовые темпы прироста основных параметров прогноза социально-экономического развития России и отрасли инфокоммуникаций (в сопоставимых условиях) по инновационному сценарию с учетом государственной программы построения информационного общества [32].

Таблица 11 – Основные параметры инновационного сценария прогноза социально-экономического развития России и отрасли инфокоммуникаций (в сопоставимых условиях)

| Показатели | Среднегодовые темпы прироста, % | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | 2005 – 2010 гг. | 2010 – 2015 гг. | 2015 – 2020 гг. | 2020 – 2025 гг. | 2025 – 2030 гг. |
| 1. Валовой внутренний продукт (физический объем) | 4,3 | 4,1 | 4,8 | 4,4 | 4,3 |
| 2.Промышленность | 8,2 | 3,9 | 4,0 | 4,1 | 3,8 |
| 3. Инвестиции в основной капитал | 6,0 | 7,3 | 7,0 | 6,0 | 5,3 |
| 4. Реальная заработная плата | 5,2 | 5,7 | 5,6 | 4,9 | 4,7 |
| 5. Объем услуг инфокоммуникаций | 6,3 | 5,2 | 5,0 | 4,8 | 4,7 |
| 6. Инвестиции в инфокоммуникации | 8,3 | 8,1 | 7,8 | 7,4 | 7,3 |

В рамках прогноза социально-экономического развития РФ до 2030 г. рассматриваются также *и другие сценарии:*

- форсированного роста, который характеризуется повышенной нормой накопления, ростом долгов частного сектора и возросшей макроэкономической несбалансированностью. Темпы прироста ВВП составят 4,7%, численность населения достигнет 147,7 млн. чел.;
- экологический вариант инновационного сценария, характеризующийся усилением требований к экологичности экономического развития (Киотский протокол) на основе снижения антропогенный эмиссии парниковых газов;

– сценарий мировой нестабильности, предполагающий реализацию негативных рисков мирового развития (финансовых, демографических, торговых дисбалансов, социально-политических конфликтов, механизмов дефолта и санкций). Глобальный прирост экономики снизится до 2,6%, против 3,4%, в условиях основного сценария.

*Различие сценариев* вытекает из разной модели мирового развития и природопользования, государственной политики социально-экономического развития страны и поведения бизнеса, обеспечения макроэкономической сбалансированности и социальной справедливости [29]. Инновационный сценарий отличается повышенной устойчивостью к возможному падению мировых цен на нефть и сырьевые товары, а также к общему ухудшению мировой динамики и усилению глобальных торговых и финансовых дисбалансов.

## Сводные результаты комплексного прогнозирования развития инфокоммуникаций

***Методический аппарат комплексной системы прогнозирования развития инфокоммуникаций*** предполагает последовательное выполнение следующих этапов:

– выявление факторов, последствий НТП, структурных сдвигов в развитии отрасли ИК;
– количественная оценка параметров развития инфокоммуникаций, включая быстродействие, пропускную способность технических средств, каналов, сетей, объемы услуг и средств доступа к инфокоммуникационным сетям и технологиям, доходы от их реализации, инвестиции, и влияния других факторов производства;
– формирование трендовых и эконометрических моделей развития инфокоммуникаций;
– разработка и корректировка прогнозов с учетом характера развития спроса на инфокоммуникации, последствий научно-технического прогресса и сценариев развития национальной экономики.

Применение общих законов развития инфраструктурной отрасли инфокоммуникаций: информационно-экономического закона, логистического закона уровня потребления с насыщением, корреляционной зависимости Джиппа, функции распределения доходов потребителей, закона эволюции микропроцессов и пропускной способности каналов связи и т.д., позволило нам спрогнозировать объемы обработанной и переданной производственной информации, доходы инфокоммуникаций, интенсивность потребления и объемы средств фиксированной и подвижной связи, вычислительных средств и пользования сетью Интернет, структурные параметры расходов пользователей на инфокоммуникации на период до 2030 года (табл. 12).

Таблица 12 – Результаты прогнозирования развития инфокоммуникаций с учетом научно-технического прогресса и макроэкономических факторов

| Наименование модели, закона и показателей | Факт | | Прогноз | |
|---|---|---|---|---|
| | 2010 г. | 2015 г. | 2020 г. | 2030 г. |
| **1. Информационно-экономический закон** | | | | |
| - объем переданной информации, Гбит | $17{,}1 \cdot 10^{18}$ | $32 \cdot 10^{18}$ | $60 \cdot 10^{18}$ | $118 \cdot 10^{18}$ |
| - ВВП, трлн. руб. | 45,1 | 81,5 | 126,0 | 230,0 |
| - доходы инфокоммуникаций, трлн. руб. | 2,0 | 3,4 | 5,4 | 13,3 |
| **2. Корреляционная зависимость Джиппа** | | | | |
| - число ОТА на 100 чел. | 31 | 29 | 28 | 27 |
| - число терминалов подвижной связи на 100 чел. | 166 | 202 | 209 | 215 |
| - число ПК на 100 чел. | 44 | 69 | 83 | 94 |
| - число пользователей Интернет на 100 чел. | 47 | 66 | 80 | 90 |
| **3. Зависимость пропускной способности связи от объема и числа источников информации**- число основных цифровых каналов | $1{,}2 \cdot 10^{8}$ | $1{,}2 \cdot 10^{9}$ | $1{,}2 \cdot 10^{10}$ | $1{,}2 \cdot 10^{11}$ |
| **4. Закон эволюции микропроцессоров** - число ПК, млн. ед. | 62 | 74 | 88 | 104 |
| **5. Логистический закон с учетом насыщения потребления** | | | | |
| - число ОТА, млн. | 45 | 38 | 35 | 31 |
| - число ПК, млн. | 62 | 99 | 120 | 135 |
| - число пользователей Интернет, млн. | 56 | 95 | 115 | 130 |
| - число терминалов подвижной связи, млн. | 238 | 290 | 300 | 310 |
| **6. Рост потребностей и расходов на ИКУ в бюджете семьи** - доля расходов на ИК, % | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,2 |

Полученные по трендовым моделям результаты прогнозирования доходов по видам связи и подсекторам информационных технологий дают возможность оценить структурные сдвиги на рынке инфокоммуникационных услуг в долгосрочном периоде (табл. 13).

Применение индексного метода и формулы $\Delta I_Д = \sum \Delta I_j \cdot d_{j0} / 100$ позволяет оценить влияние изменений доходов по видам услуг на общее изменение доходов отрасли инфокоммуникаций и ее секторов. При реализации инновационного варианта социально-экономического развития России на период до 2030 г. рост доходов инфокоммуникаций в 5,35 раза обусловлен ростом доходов от услуг связи на 72%, от сектора информационных технологий – на 28%.

В разрезе видов связи на прирост доходов от услуг связи определяющее воздействие оказывают услуги подвижной связи – 51,3%, документальной связи – 19,7%, услуги космической связи, присоединения и пропуска трафика – 19,2% при невысоких долях воздействия телефонной и почтовой связи.

Таблица 13 – Влияние развития секторов инфокоммуникаций на изменение доходов отрасли за 2012-2030 годы

| Сектора, подотрасли | Доля в 2012 г., % | Темп изменения за 2012-2030 гг., % | Влияние на прирост доходов, % | |
|---|---|---|---|---|
| | | | абсолютное | относительное |
| **1. Доходы инфокоммуникаций** | 100,00 | 535,3 | 535,3 | 100,0 |
| - сектор связи | 70,55 | 546,4 | 385,5 | 72,0 |
| - сектор информационных технологий | 29,45 | 508,8 | 149,8 | 28,0 |
| **2. Доходы от услуг связи** | 100,0 | 546,4 | 546,4 | 100,0 |
| - почтовая связь | 7,4 | 489,8 | 36,2 | 6,6 |
| - международная, внутризоновая и междугородная телефонная связь | 8,05 | 67,9 | 5,5 | 1,0 |
| - местная телефонная связь | 11,67 | 100,7 | 11,8 | 2,2 |
| - документальная связь | 10,87 | 990,5 | 107,7 | 19,7 |
| - подвижная связь | 43,8 | 640,4 | 280,5 | 51,3 |
| - услуги космической связи, присоединения, пропуска трафика и другие доходы | 19,79 | 529,0 | 104,7 | 19,2 |
| **3. Доходы сектора информационных технологий** | 100,0 | 508,8 | 508,8 | 100,0 |
| - аппаратные средства | 58,8 | 424,1 | 249,4 | 49,0 |
| - программные средства | 15,8 | 582,4 | 92,0 | 18,1 |
| - информационные услуги | 25,4 | 659,0 | 167,4 | 32,9 |

Таким образом, структурные сдвиги на рынке услуг связи характеризуются превалированием на две третьих перспективных высококачественных и технологичных услуг мобильной связи, передачи данных, услуг мультисервисного характера с широкополосным доступом к инфокоммуникационным сетям и ресурсам.

Секторальный структурный анализ доходов сектора информационных технологий указывает на существенное изменение влияния доли доходов от информационных услуг и программных средств по сравнению с предшествующим периодом, что обуславливается сбалансированной политикой в сфере производства отечественных аппаратных и программных средств, повсеместным распространением ИКТ и развитием рынка информационных продуктов в конвергенции с телекоммуникационными услугами.

На рис. 8 представлена прогнозируемая видовая структура доходов секторов связи и информационных технологий в 2030 году, которая характеризуется инновационным направлением структурных сдвигов в доходах сектора связи, а именно ростом доли услуг подвижной связи за 15 лет на 10,5% и услуг документальной связи на 5,6% и снижением долей почтовой и телефонной связи, а также сбалансированной рыночной структурой сектора информационных технологий с ростом доли программных средств на 14,7% и информационных услуг на 7,3% при сокращении доли аппаратных средств на 20%.

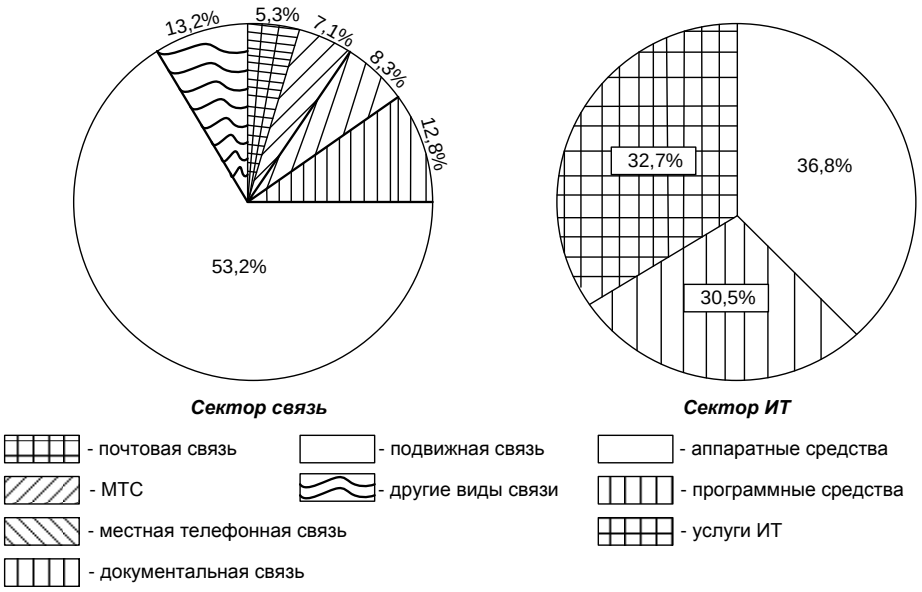



Рис. 8. Видовая структура доходов
секторов связи и информационных технологий в 2030 г.

Прогнозные структурные сдвиги в доходах отрасли инфокоммуникаций на долгосрочный период подтверждают выявленную тенденцию роста долей новых услуг и новых операторов и устойчивый характер структурной динамики отрасли. Разработанные прогнозы основных социально-экономических показателей деятельности отрасли инфокоммуникаций должны быть скорректированы с учетом характера развития спроса на услуги инфокоммуникаций, последствий НТП и условий развития национальной экономики (табл. 14).

Таблица 14 – Прогноз макроэкономических показателей РФ и доходов инфокоммуникаций до 2030 г.

| Годы | Валовой внутренний продукт, млрд. руб. | Численность занятых в экономике, млн. чел. | Инвестиции в основной капитал, млрд. руб. | Фонд заработной платы, млрд. руб. | Доходы инфоком-муникаций, млрд. руб. |
|---|---|---|---|---|---|
| 2015 | 81486 | 68,2 | 18626 | 20406 | 3092,6 |
| 2020 | 135705 | 66,6 | 35272 | 33244 | 6416,0 |
| 2025 | 208485 | 64,9 | 59046 | 49844 | 8130,2 |
| 2030 | 299863 | 64,3 | 90356 | 73551 | 13291,4 |
| Темп изменения за 2015-2030 гг., % | 494,9 | 93,0 | 730,3 | 498,7 | 535,3 |
| Среднегодовой темп изменения 2015-2030 гг., % | 109,3 | 96,0 | 111,7 | 109,35 | 109,75 |

В качестве индикаторов потребления инфокоммуникационных услуг и средств на прогнозный период принимаются целевые показатели в соответствии с инновационным вариантом прогноза развития инфокоммуникаций на 2030 г.

Применение разработанного уравнения регрессии зависимости темпа прироста ВВП от темпов прироста основных факторов [33, с. 32] на прогнозируемый период до 2030 года дает весьма достоверные результаты. Так, темп прироста ВВП за период 2012–2030 г. по темпам прироста макроэкономических факторов составил 9,303% (2,07–1,2·0,04+0,306·11,7+0,205·9,35+0,183·9,75) при среднегодовом приросте за 18 лет в 9,3%.

Сопоставление величин ВВП и доходов инфокоммуникаций, прогнозируемых по информационно-экономическому закону развития (табл. 12), с прогнозируемыми по трендовым моделям и сценарным условиям социально-экономического развития страны (табл. 14) свидетельствует о возможностях еще более высоких темпов роста за счет задействования как внутренних, так и внешних факторов отраслевой динамики. Для применения факторной модели оценки доходов инфокоммуникаций все параметры в прогнозном периоде сведены в табл. 15, используя полученные ранее выводы о динамике и структуре макроэкономических и внутренних факторов.

Проводя расчеты по факторной модели оценки динамики доходов инфокоммуникаций (в темпах прироста) по формуле (1), можно установить количественно влияние факторов на общий прирост доходов. Так среднегодовой прирост доходов инфокоммуникаций по приростной факторной модели за 20-летний период составляет:

$$\Delta I_{Д}^{ИК} = \Delta I_{ИК}^{МЭ} \cdot d_{МЭ} + \Delta I_{ИК}^{ВН} \cdot d_{ВН} = (\Delta I_{ВВП} \cdot d_{ИК}^{ВН} + \Delta I_{З} \cdot d_{расх} + \Delta I_{инв} \cdot d_{инв}^{ИК}) \cdot d_{МЭ} +$$
$$+\left[\Delta I_{Днов.усл.}^{ИК} \cdot d_{нов.усл.}^{ИК} + (\Delta I_{инф}^{МЭ} - \Delta I_{тар}^{ИК}) \cdot \Delta I_{d_{нов.усл.}} + \Delta I_{Д_{тр}}^{ИК} \cdot d_{тр}^{ИК} + \Delta I_{инв}^{ИК} \cdot \Delta d_{циф}\right] \cdot d_{ВН} =$$
$$= (9,3 \cdot 0,0443 + 9,35 \cdot 0,042 + 11,7 \cdot 0,0188) \cdot 0,08 + (13,2 \cdot 0,7 + (4,8 - 2,8) \cdot$$
$$\cdot 0,02 + 3,2 \cdot 0,3 + 3,1 \cdot 0,06) \cdot 0,92 = (0,412 + 0,393 + 0,220) \cdot 0,08 + (9,24 + 0,04 +$$
$$+0,96 + 0,186) \cdot 0,92 = 1,025 \cdot 0,08 + 10,426 \cdot 0,92 = 0,082 + 9,592 = 9,674\%.$$

В общем синергетическом приросте на долю макроэкономических факторов приходится менее 1% (0,85), на долю внедрения новых услуг – 87,9%, на долю фактора снижения тарифов по сравнению с инфляцией – 0,45%, на долю развития традиционных и социальных услуг – 9,1% и инновационной составляющей развития рынка инфокоммуникационных услуг – 1,8%. Таким образом, рациональная тарифная и инновационная политика отрасли по всем векторам деятельности дает дополнительно 0,37% (9,67% – 9,3%) ежегодного прироста доходов (в стоимостном выражении это идентично получению ежегодно дополнительных доходов на сумму 4,56 млрд. руб.).

Результаты прогноза темпов прироста доходов отрасли инфокоммуникаций по прогнозным периодам до 2030 года свидетельствуют о возможности более высокой ежегодной приростной динамике результатов деятельности отрасли за счет более полного задействования макроэкономических и внутренних факторов на основе реализации задач инфокоммуникационного развития по всем направлениям и всеми средствами, т.е. на основе сбалансированной технической, экономической и организационной политики.

Таблица 15 – Результаты прогнозирования доходов инфокоммуникаций до 2030 г. по факторной модели

| Показатели | Среднегодовые значения за период | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2010 – 2015 гг. | 2015 – 2020 гг. | 2020 – 2025 гг. | 2025 – 2030 гг. |
| 1. Темпы прироста ВВП, % | 12,5 | 10,75 | 8,95 | 7,55 |
| 2. Темп прироста фонда заработной платы работников, % | 11,65 | 10,25 | 8,45 | 8,1 |
| 3. Темп прироста инвестиций в основной капитал, % | 15,25 | 13,65 | 10,85 | 8,85 |
| 4. Доля инфокоммуникаций в ВВП, % | 4,41 | 4,25 | 4,72 | 3,9 |
| 5. Доля расходов потребителей на инфокоммуникации, % | 3,8 | 3,9 | 4,0 | 4,1 |
| 6. Доля инвестиций в развитие ИК в общем объеме, % | 2,33 | 1,84 | 1,38 | 1,05 |
| 7. Темп прироста доходов от новых ИКУ, % | 10,36 | 15,4 | 11,8 | 8,8 |
| 8. Темп прироста доходов от традиционных услуг, % | 5,3 | 2,3 | 2,0 | 1,8 |
| 9. Темп прироста инвестиций в отрасли ИК, % | 9,3 | 6,1 | 4,45 | 3,1 |
| 10. Темп прироста макроэкономической инфляции, % | 6,0 | 4,7 | 4,5 | 4,0 |
| 11. Темп прироста тарифов на ИКУ, % | 3,5 | 2,8 | 2,5 | 2,3 |
| 12. Доля доходов от новых ИКУ, % | 64,0 | 66,0 | 68,0 | 70,0 |
| 13. Прирост уровня цифровизации сетей связи, % | 10,0 | 8,0 | 5,0 | 0,0 |
| 14. Прирост доли доходов от новых услуг, % | 3,0 | 2,0 | 2,00 | 2,0 |
| 15. Темп прироста доходов инфокоммуникаций, % | | | | |
| - по прогнозу | 10,95 | 10,8 | 9,55 | 8,2 |
| - по факторной модели | 10,78 | 10,71 | 9,48 | 8,08 |
| - по трендовым моделям | 9,96 | 9,75 | 9,5 | 8,5 |

Обеспечению более высоких темпов роста инфокоммуникаций способствует эффект масштаба производства, состоящий в снижении тарифов на оказываемые услуги при значительном увеличении продуктового рынка. Научно-технический процесс, с одной стороны, конвергенция систем, сетей, технологий и услуг, с другой стороны, ведут к удешевлению технических компонентов инфокоммуникаций при росте их производительности и пропускной способности. Так в отрасли инфокоммуникаций с начала XXI века наблюдается снижение тарифов на инфокоммуникационные услуги. Поэтому при разработке прогнозов развития инфокоммуникаций обобщенный индекс тарифов - индекс-дефлятор по отрасли и ее составляющим принимается на долгосрочный период с тенденцией снижения с 4,5% до 2,3% (рис. 9).

Снижение тарифов на инфокоммуникационные услуги способствует росту благосостояния населения страны и еще более высокому уровню

потребления ИКУ и ИКТ в частной и деловой сферах. С другой стороны, тенденция к снижению и низкий уровень индекса-дефлятора по отрасли инфокоммуникаций свидетельствует о совпадении динамики стоимостного и физического выражения отраслевых доходов от услуг и нивелировании влияния ценового фактора на динамику результатов деятельности. Этот факт имеет глубокий экономико-маркетинговый смысл для развития системы отношений «спрос – предложение», когда для потребителя критерием выбора ИКУ становится не цена (тариф), а только потребительские свойства услуги (технологичность, сервис, удобство).

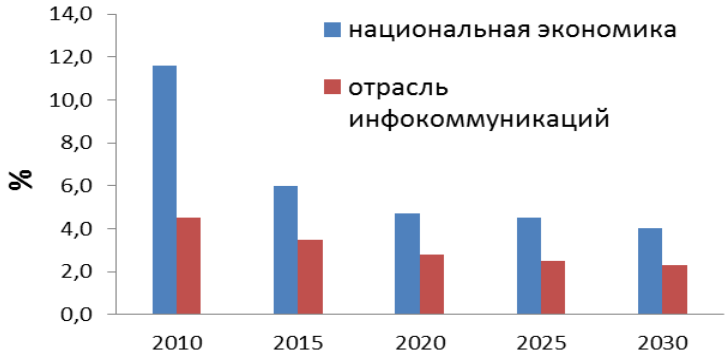



Рис. 9. Прогнозная динамика индексов-дефляторов по отрасли инфокоммуникаций и национальной экономике

Прогнозный период для инфокоммуникационного сектора является переломным как по масштабам производства, так и экономическим параметрам. Прогнозируемые результаты научно-технического прогресса выражаются в существенном росте технических характеристик (быстродействие, пропускная способность, длительность автономной работы) с одновременной миниатюризацией и универсализацией оборудования, а также ростом интеллектуальных возможностей программных средств. Постоянный рост потребностей в передаче информации, новых услугах и приложениях будет реализовываться на сетях передачи данных, спутниковой и беспроводной подвижной связи. Одной из ключевых тенденций развития инфокоммуникаций станет конвергенция технологических платформ для доставки различных видов информации (текст, речь, данные, видео, теле-и радиопрограммы). Применение прогрессивных технологий способствует снижению стоимости и тарифов на инфокоммуникационные услуги. Объем рынка инфокоммуникационного сектора экономики вырастет в 2,5 раза.

Результаты прогноза развития отрасли инфокоммуникаций в соответствии с методическим аппаратом комплексной системы прогнозирования и инновационным сценарием, представленные на рис. 10, демонстрируют устойчивую тенденцию к росту параметров развития отрасли, что приведет к увеличению доли организаций национальной экономики, использующих ИКТ в своей деятельности, росту доли инфокоммуникационных услуг на рынке услуг и вклада отрасли инфокоммуникаций в валовой внутренний продукт нашей страны.

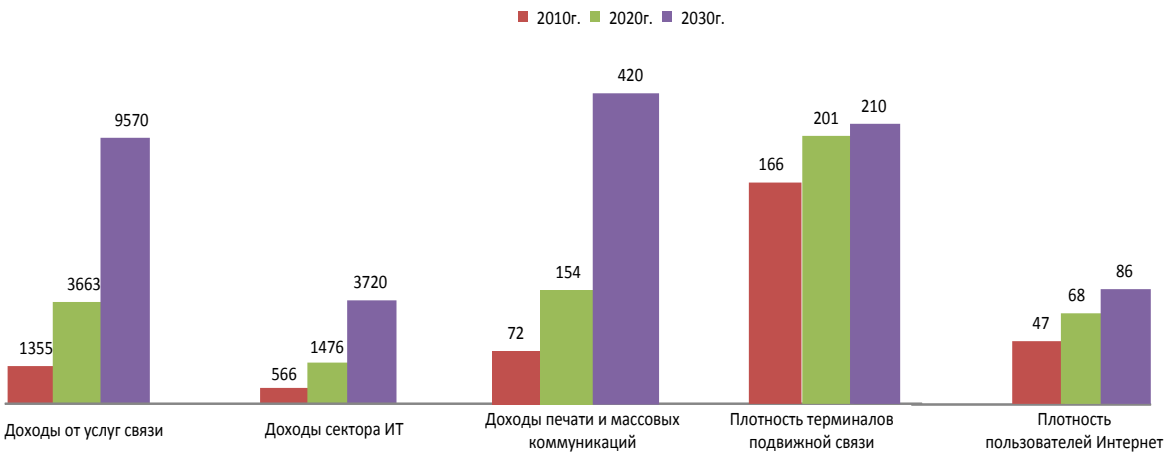



Рис. 10. Прогноз основных показателей развития инфокоммуникаций на период до 2030 года

Через 15-20 лет доступ к сети Интернет, число средств связи и вычислительной техники достигнут уровня насыщения, т.е. почти каждый человек будет иметь доступ к инфокоммуникационным сетям и информационным ресурсам.

Поскольку инфокоммуникации являются динамичным структурообразующим сектором национальной экономики и катализатором роста стратегически важных отраслей, то в перспективе их развитие будет способствовать изменению факторов роста экономики России, а именно: уменьшению доли внешних факторов (рост цены нефти, объемов экспорта сырья и полезных ископаемых) и росту доли внутренних факторов (расширение инновационных производств и диверсификация экспорта, рост эффективности производства и инвестиций в развитие экономики, рост доходов населения). Это позволит нашей стране перейти из III группы стран со среднедушевым ВВП в 5-10 тыс. долл. В 2030 г. в I группу развитых стран с душевым ВВП более 20 тыс. долл. (по методике Мирового банка).

Корректировка прогнозов развития инфокоммуникаций, полученных по трендовым моделям и сценарным условиям социально-экономического развития страны, с учетом последствий НТП, влияния факторов макроэкономического и внутреннего характера, структурной динамики развития рынков инфокоммуникационных услуг и оборудования дает возможность обоснованного определения перспектив развития не только инфокоммуникаций, но и всего российского общества, что в свою очередь способствует устойчивости социально-экономического развития и построения информационного общества.

## Заключение

Разработанный методический аппарат прогнозирования развития инфокоммуникаций представляет собой систему формирования моделей прогнозирования с трех позиций: последствий научно-технического прогресса, конвергенции и макрогенерации услуг; проявления тенденций и структурных

сдвигов в динамике основных параметров развития инфокоммуникаций, интенсивности потребления и доступности инфокоммуникационных средств и услуг; воздействия макроэкономических факторов и сценариев социально-экономического развития Российской Федерации.

Оценка тенденций макроэкономического и научно-технического развития инфокоммуникаций в соответствии с информационно-экономическим законом, зависимостями Джиппа, пропускной способностью каналов связи, законом эволюции микропроцессоров, логистическим законом потребления с учетом насыщения позволяет получить оптимистический прогноз ВВП, доходов инфокоммуникаций, числа терминалов фиксированной и подвижной связи, персональных компьютеров, цифровых каналов, а также удельных расходов пользователей на инфокоммуникационные услуги и абонентские средства.

Построение трендовых моделей инфокоммуникационной плотности, доходов отрасли и ее секторов на средне и долгосрочную перспективу по различным функциям с учетом макроэкономических циклов и сценариев социально-экономического развития дает возможность получить пакет наиболее адекватных прогнозных моделей. Использование зависимости ВВП и его прироста от макроэкономических факторов инновационного развития, включая инфокоммуникации, и формирование средств достижения целей развития национальной экономики и инфокоммуникационного сектора служат основанием подтверждения реальности достижения прогнозных величин на упреждаемый период.

Применение индексного метода оценки влияния секторального (видового) развития и факторной модели оценки изменения доходов отрасли инфокоммуникаций конкретизировало влияние внешних и внутренних факторов в количественном выражении, что позволило скорректировать прогнозы трендовых моделей с учетом последствий НТП, сценарных условий развития национальной экономики и структурообразующих факторов.

Рассматриваемый аналитико-прогнозный аппарат по всем формулам, моделям и методам подтверждается конкретными расчетами и результатами, а его научная обоснованность – логико-математическим доказательством и близостью полученных по разным методам и с разных позиций результатов прогнозирования развития инфокоммуникаций.

## Литература

1. Бутакова М. М. Экономическое прогнозирование: методы и приемы практических расчетов: Учебное пособие. – М.: КНОРУС, 2008. – 168 с.

2. Салютина Т. Ю. Методический и эконометрический аппарат оценки рыночного потенциала компаний связи: монография. – М.: ГУУ, 2009. – 217 с.

3. Боровиков В. П., Ивченко Г. И. Прогнозирование в системе STATISTICA в среде Windows: Основы теории и интенсивная практика на компьютере: Учеб. пособие. – М.: Финансы и статистика, 2006. – 368 с.

4. Кондратьев Н. Д. Проблемы экономической динамики. – М.: Экономика, 1989. – 523 с.

5. Кремер Н. Ш., Путко Б. А., Тришин И. М., Фридман М. Н. Исследование операций в экономике. – М.: ЮРАЙТ, 2010. – 368 с.

6. Магницкий Н. А. Теория динамического хаоса. – М.: Ленанд/URSS, 2011. – 320 с.

7. Рейнов Ю. И. Математические модели и методы в экономике. СПб.: ЮТАС, 2009. – 574 с.

8. Аджемов А. С. Телекоммуникации, инфокоммуникации – что дальше? Облака! – М.: «ИД Медиа Паблишер», 2012. – 174 с.

9. Кузовкова Т. А., Тимошенко Л. С. Анализ и прогнозирование развития инфокоммуникаций. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 224 с.

10. Кузовкова Т. А., Володина Е. Е., Кухаренко Е. Г. Экономика отрасли инфокоммуникаций. Учебное пособие для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2014. – 190 с.

11. Варакин Л. Е. 25 лет инфокоммуникационной революции. – М.: МАС, 2006. – 264 с.

12. Голышко А. В. Источники и составные части реконструкции отрасли связи // Электросвязь. 2007. № 2. С. 2–6.

13. Варакин Л. Е., Пожарский Д. А., Шинилов А. Т. Развитие инфокоммуникаций России на период 1991–2006 годы. Итоги 15-летней эпохи. – М.: МАС, 2007. – 216 с.

14. Кузовкова Т. А., Салютина Т. Ю., Тимошенко Л. С., Шаравова О. И. Статистика связи: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 2003. – 624 с.

15. Кузовкова Т. А., Салютина Т. Ю., Шаравова О. И. Статистика инфокоммуникаций. Учебник для вузов. – М.: Горячая линия–Телеком, 2015. – 554 с.

16. Каплан А. В., Каплан В. Е., Мащенко М. В., Овечкина Е. В. Математика, статистика, экономика на компьютере. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 600 с.

17. Зоря Н. Е., Женчур М. А., Кузовкова Т. А., Устинова Ю. В. Прогнозирование развития инфокоммуникаций. Учебное пособие. – М.: МТУСИ, 2013. – 115 с.

18. Глазьев С. Ю. Эволюция технико-экономических систем: возможности и границы централизованного регулирования. – М.: Наука, 1992 – 594 с.

19. Варакин Л. Е. Информационно-экономический закон. Взаимосвязь инфокоммуникационной инфраструктуры и экономики. – М.: МАС, 2006. – 106 с.

20. Макаров В. В., Горбачев В. Л., Желтоносов В. М., Колотов Ю. О. Новая экономика: интеграция рынков финансовых и инфокоммуникационных услуг. – М.: Academia, 2009. – 224 с.

21. Мардер С. Н. Смена парадигмы телекоммуникаций и семиуровневая модель взаимодействия открытых систем // Электросвязь. 2007. № 2. С. 9–10.

22. Сапир Ж. К экономической теории неоднородных систем: Опыт исследования децентрализованной экономики. – М.: ГУ ВШЭ, 2001. – 248 с.

23. Статистика: Учебник / Под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Проспект, 2010. – 448 с.

24. Эконометрика: Учебник для магистров / Под ред. И. И. Елисеевой. – М.: Юрайт, 2012. – 386 с.

25. Кендалл М., Стюарт А. Теория распределений. Пер. с англ. / Под ред. А. Колмогорова. – М.: Наука, 2001. – 341с.

26. Инфокоммуникации информационного общества. Книга 1 / Под ред. Л. Е. Варакина. – М.: МАС, 2006. – 544 с.

27. Шумпетер Й. Теория экономического развития. – М.: Прогресс, 1982. – 628 с.

28. Российский статистический ежегодник. 2000–2005: Стат. сб. / Росстат. – М.: 2001–2006. – 730 с.

29. Сценарные условия долгосрочного прогноза социально-экономического развития Российской Федерации до 2030 года. – М.: Минэкономразвития, 2012. – 61 с.

30. Материалы МСЭ. Измерения для информационного общества – Индекс развития ИКТ. – Женева, 2009. – 156 с.

31. Индикаторы информационного общества: 2014. Статистический сборник. – М.: НИИ «ВШЭ», 2015. – 320 с.

32. Государственная программа «Информационное общество (2011-2020 годы)», утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 20 октября 2010 года № 1815-р.

33. Кузовкова Т. А. Оценка роли инфокоммуникаций в национальной экономике и выявление закономерностей ее развития // Системы управления, связи и безопасности. 2015. № 4. С. 26-68.

## References

1. Butakova M. M. *Ekonomicheskoe prognozirovanie: metody i priemy prakticheskih raschetov* [Economic forecasting: methods and techniques for practical calculations: the manual]. Moscow, KNORUS Publ., 2008, 168 p. (in Russian).

2. Salutina T. Y. *Metodicheskij i ekonometricheskij apparat ocenki rynochnogo potenciala kompanij svjazi* [Methodological and econometric assessment of the market potential of Telecom companies]. Moscow, State University of Management Publ., 2009, 217 p. (in Russian).

3. Borovikov V. P., Ivchenko G. I. *Prognozirovanie v sisteme STATISTICA v srede Windows: Osnovy teorii i intensivnaia praktika na komp'iutere* [Forecasting in the STATISTICA system in Windows environment: basic theory and intensive practice on the computer]. Moscow, Finances and statistics Publ., 2006, 368 p. (in Russian).

4. Kondratiev N. D. *Problemy ekonomicheskoi dinamiki* [Problems of economic dynamics]. Moscow, Economics, 1989, 523 p. (in Russian).

5. Kremer N. W., Putko B. A., Trishin I. M., Fridman M. N. *Issledovanie operatsii v ekonomike* [Operations research in the economy]. Moscow, YURAIT Publ., 2010, 368 p. (in Russian).

6. Magnitskii N. A. *Teoriia dinamicheskogo khaosa* [Theory of dynamical chaos], Moscow, Lenand/URSS Publ., 2011, 320 p. (in Russian).

7. Reinov Y. I. *Matematicheskie modeli i metody v ekonomike* [Mathematical models and methods in Economics]. St. Petersburg, Utah, 2009, 574 p. (in Russia).

8. Adjemov A. S. [Telecommunications, Infocommunications – what's next? Clouds!]. Moscow, "ID Media publisher" Publ., 2012, 174 p. (in Russian).

9. Kuzovkova T. A., Timoshenko L. S *Analiz i prognozirovanie razvitiia infokommunikatsii* [Analysis and Forecast of Infocommunication Development]. Moscow, Goriachaia Liniia-Telekom Publ., 2009, 224 p. (in Russian).

10. Kuzovkova T. A., Volodina E. E., Kukharenko E. G. [*The Economics of the telecommunications industry*]. Moscow, Goriachaia Liniia-Telekom Publ., 2014, 190 p. (in Russian).

11. Varakin L. E. *25 let infokommunikatsionnoi revoliutsii*. *Sbornik trudov* [25 Years of Infocommunication Revolution (collected papers)]. Moscow, International Telecommunications Academy Publ., 2006, 264 p. (in Russian).

12. Golyshko A. V. Istochniki i sostavnye chasti rekonstruktsii otrasli sviazi [The Sources and components of the reconstruction of the telecommunication industry]. *Electrosvyaz*, 2007, no. 2, pp. 2-6 (in Russian).

13. Varakin L. E., Pozharsky D. A., Chinilov A. T. *Razvitie infokommunikatsii Rossii na period 1991 – 2006 gody. Itogi 15-letnei epokhi* [The development of Infocommunications of Russia for the period 1991 – 2006. The results of 15 years of age]. Moscow, MAS, 2007, 216 p. (in Russian).

14. Kuzovkova T. A., Saliutina T. Y., Timoshenko L. S., Sharavova O. I. *Statistika sviazi* [Communications statistics]. Moscow: Radio and communication, 2003, 624 p. (in Russian).

15. Kuzovkova T. A., Saliutina T. Y., Sharavova O. I. *Statistika infokommunikatsii* [Statistics of Communications]. Moscow, Goriachaia Liniia-Telekom Publ., 2015, 554 p. (in Russian).

16. Kaplan A. V., Kaplan V. E., Mashchenko M. V., Ovechkina E.V. Matematika, statistika, ekonomika na komp'iutere [Mathematics, statistics, Economics on computer]. Moscow, DMK Press, 2006, 600 p. (in Russian).

17. Zorya N. E., Gencer M. A., Kuzovkova T. A., Ustinova Y. V. *Prognozirovanie razvitiia infokommunikatsii* [Forecasting of development of Infocommunications]. Moscow, 2013, 115 p. (in Russian).

18. Glaz'ev S. Y. *Evoliutsiia tekhniko-ekonomicheskikh sistem: vozmozhnosti i granitsy tsentralizovannogo regulirovaniia* [The Evolution of Techno-Economic Systems: Possibilities and Limits of Centralized Regulation]. Moscow, Nauka Publ., 1992, 594 p. (in Russian).

19. Varakin L. E. *Informatsionno-ekonomicheskii zakon. Vzaimosviaz' infokommunikatsionnoi infrastruktury i ekonomiki* [Information and Economic Law. The Relationship of Infocommunication Infrastructure and Economy]. Moscow, International Telecommunications Academy, 2006, 106 p. (in Russian).

20. Makarov V. V., Gorbachev V. L., Sultanov V. M.. Kolotov Y. O. *Novaia ekonomika: integratsiia rynkov finansovykh i infokommunikatsionnykh uslug* [New economy: integration of financial and information and communication services]. Moscow, Academia, 2009, 224 p. (in Russian).

21. Marder S. N. Smena paradigmy telekommunikatsii i semiurovnevaia model' vzaimodeistviia otkrytykh sistem [Paradigm shift of telecommunications and seven-layer model of open systems interaction]. *Electrosvyaz*, 2007, no. 2, pp. 9-10 (in Russian).

22. Sapir J. *K ekonomicheskoi teorii neodnorodnykh sistem: Opyt issledovaniia detsentralizovannoi ekonomiki* [The economic theory of inhomogeneous systems: the Experience of the study of the decentralized economy]. Moscow, HSE, 2001, 248 p. (in Russian).

23. Eliseeva I. I. *Statistika* [Statistics]. Moscow, Prospekt Publ., 2010, 448 p. (in Russian).

24. Eliseeva I. I. *Ekonometrika* [Econometrics], Moscow, Yurait Publ., 2012, 386 p. (in Russian).

25. Kendall M., Stuart A., Kolmogorov A. *Teoriia raspredelenii* [The Theory of distributions]. Moscow, Nauka Publ., 2001, 341 p. (in Russian).

26. Varakin L. E. *Infokommunikatsii informatsionnogo obshchestva* [Infocommunications of the information society]. Moscow, WT Publ., 2006, 544 p. (in Russian).

27. Schumpeter J. *Teoriia ekonomicheskogo razvitiia* [Theory of economic development]. Moscow, Progress Publ., 1982, 628 p. (in Russian).

28. Russian statistical Yearbook. 2010–2014. Moscow, Rosstat Publ., 2011–2015, 730 p. (in Russian).

29. *Stsenarnye usloviia dolgosrochnogo prognoza sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiia Rossiiskoi Federatsii do 2030 goda* [Scenario conditions of long-term socio-economic development of the Russian Federation until 2030]. Moscow, The Ministry of Economic Development, 2012, 61 p. (in Russian).

30. *Izmereniia dlia informatsionnogo obshchestva–Indeks razvitiia IKT* [Measuring for the information society–the ICT development Index]. Geneva, ITU Publ., 2009, 156 p. (in Russian).

31. *Indikatory informatsionnogo obshchestva: 2014* [Indicators information society: 2014]. Moscow, Research Institute "HSE", 2015, 320 p. (in Russian).

32. *Gosudarstvennaia programma «Informatsionnoe obshchestvo (2011-2020 gody)»* [The state program "Information society (2011-2020)"], approved by order of the Government of the Russian Federation from 20 October 2010, No. 1815-R (in Russian).

33. Kuzovkova T. A. Evaluation of the Role of Infocommunications in the National Economy and to Identify Patterns of Development. *Systems of Control, Communication and Security*, 2015, no. 4, pp. 26-68 (in Russian).

**Статья поступила 19 декабря 2015 г.**

## Информация об авторах

*Кузовкова Татьяна Алексеевна* – доктор экономических наук, профессор кафедры экономики связи. Декан факультета экономики и управления. Московский технический университет связи и информатики. Область научных интересов: экономика, статистика, мониторинг, прогнозирование инфокоммуникаций. Тел.: +7 (499) 192 86 57. E-mail: tkuzovkova@me.com

*Женчур Максим Александрович* – кандидат экономических наук, доцент кафедры экономики связи. Московский технический университет связи и информатики. Область научных интересов: экономика, прогнозирование инфокоммуникаций. Тел.: +7 (499) 192 84 74. E-mail: zhenchur@gmail.com

*Кузовков Александр Дмитриевич* – аспирант кафедры экономики связи. Московский технический университет связи и информатики. Область научных интересов: экономика, статистика, прогнозирование инфокоммуникаций. Тел.: +7 (499) 192 84 74. E-mail: alexkuzovkov@mail.ru

Адрес:111024, Россия, г. Москва, Авиамоторная ул., дом 8А

---

## Methodological Apparatus of the Integrated Forecasting of the Development of Infocommunications

T. A. Kuzovkova, M. A. Gencer, A. D. Kuzovkov

***The purpose*** *of paper is formation of the methodological base for the infocommunications development. This methodology is based on the revealed patterns of scientific and technical progress.* ***Methods****. Methodology of long-term forecasts were carried out on the basis of a methods of extrapolation, methods of structural analysis and factor analysis, models of autoregression, models of correlation.* ***The final result*** *of this paper was formation of the methodological apparatus for the integrated long-term forecasting of the infocommunications development on the basis of economic and technical factors.* ***Practical relevance****. Methodological apparatus wich was synthesized by authors allow make long-term forecasting for development of the infocommunications area. Long-term forecasting based on economic factors and technical factors with the development of the national economy.*

***Key words:*** *infocommunications, information and economic law, statistical methods of correlation and regression, trend and factor models.*

## Information about Authors

*Tatiana Alekseevna Kuzovkova* – Dr. habil. of Economics, Professor of the Department of Economics of Communication. Dean of the Faculty of Economics and Management. Moscow Technical University of Communications and Informatics. Research interests: Economics, statistics, monitoring, forecasting of telecommunications. Tel.: +7 499 192 86 57. E-mail: tkuzovkova@me.com

*Maxim Aleksandrovich Gencur* – Ph.D. of Economic Sciences, associate Professor in the Department of Economics of Communication. Moscow technical University of Communications and Informatics. Research interests: economics, forecasting of telecommunications. Tel.: +7 499 192 84 74. E-mail: zhenchur@gmail.com

*Alexander Dmitrievich Kuzovkov*– Postgraduate Student of the Department of Economics of Communication. Moscow Technical University of Communications and Informatics. Research interests: Economics, statistics, forecasting of telecommunications. Tel.: +7 499 192 84 74. E-mail: alexkuzovkov@mail.ru

Address: 111024, Russia, Moscow, Aviamotornaya str., 8A.

УДК 681.324.067

# Геном информатизации и корпоративная иммунология интернета

Осовецкий Л. Г.

***Постановка задачи.*** *Лавинообразное развитие сети Интернет, как комплекса взаимоувязанных программных средств корпоративных сетей, актуализирует вопросы обеспечения безопасности Интернет, как единой сложной системы.* ***Цель работы.*** *В статье ставится проблема функциональной безопасности Интернет как комплекса программных средств корпоративных сетей, влияющих на безопасность пользователей.* ***Используемые методы.*** *Для оценки функциональной безопасности Интернет в статье выделены факторы, наибольшим образом влияющие на факторы, определяющие уязвимость Интернета, рост объемов мертвого кода.* ***Новизна работы.*** *Функциональная безопасность комплекса программ Интернет рассмотрена с точки зрения корпоративных пользователей, при этом использована аналогия развития информационных технологий с эволюцией информационной генетической системы человека. Для детализации требований по функциональной безопасности Интернет целесообразно использовать аналогию построения информационно-программных систем Интернет с информационной генетической системой живых организмов, а системы защиты и безопасности информации – с построением иммунной системы живых организмов.* ***Результаты.*** *Показано, что безопасность Интернета, как комплекса программных средств, определяется минимизацией уязвимостей используемых программ и степенью защищенности корпоративных сетей, функционирующих в составе Интернет. Характеристики и показатели информационной безопасности отдельных программных средств и крупных комплексов программ в составе сети Интернет существенно отличаются. Нормативные документы по требуемым показателям защищенности и безопасности информации, должны учитывать фактор различной размерности функционального программного обеспечения.*

***Ключевые слова****: безопасность, Интернет, корпоративные системы, угрозы, уязвимость, геном, популяция.*

## Введение

Важнейшей проблемой, определяющей темпы и будущее развитие Интернета, становится информационная безопасность. Глубокое проникновение компьютерных информационных технологий (ИТ), телекоммуникационных технологий (ИКТ), Интернет во все сферы человеческой деятельности и многочисленные проблемы в их защите требуют более широкого внедрения защищенных информационных технологий. Уже сегодня информационные технологии являются «нервной системой» каждого развитого государства и мира в целом, которая позволяет функционировать остальным его подсистемам. А ядром всей информационной инфраструктуры становится сеть Интернет. В настоящее время сеть Интернет объединяет миллионы компьютеров во всем мире. Эти же компьютеры контролируют реальные физические объекты такие как, электрические станции, поезда, химические реакции, радары, сырьевые рынки, которые сами находятся вне пространства сети Интернет. Таким образом, ИТ, ТКС, Интернет становятся критическими информационными технологиями, способными влиять на национальную безопасность отдельных стран и мира в целом.

Правительства развитых стран, чьи экономика и национальная безопасность уже в настоящее время находятся в сильной зависимости от информационных технологий и информационной инфраструктуры, осознают надвигающуюся опасность и предпринимают соответствующие контрмеры. Понимание важности вопросов безопасности глобальных телекоммуникационных технологий Правительством России нашло отражение в Доктрине Информационной Безопасности РФ от 9 сентября 2000 года, отражающей совокупность официальных взглядов на цели, задачи, принципы и основные направления обеспечения информационной безопасности Российской Федерации. Отмечено, что одним из основных методов обеспечения информационной безопасности в РФ является «формирование **системы мониторинга** показателей и характеристик информационной безопасности Российской Федерации в наиболее важных сферах жизни и деятельности общества и государства». Проводится разработка новой версии Доктрины.

Следует учитывать, что глобальное развитие информационных технологий и Интернета в мире несет не только положительный эффект. Их рост и применение влечет за собой угрозы не только информационной безопасности людей, но и существенно влияет на эволюционное развитие человечества в целом, в том числе и отрицательное. Появились и прогрессируют новые понятия в области безопасности. Это киберпреступность и кибербезопасность, вирусная активность, несанкционированный доступ к информации и кибершпионство, информационные войны и киберустойчивость.

Это влияние ИТ, ТКС и Интернета на жизнь людей при увеличении новых вариантов угроз безопасности заставляет задуматься о перспективах и источниках их появления. Представление о том, что ИТ, ТКС и Интернет – порождение человека, а не природы, и поэтому полностью находится под управлением человека, не выдерживает критики. Эти объекты сегодня представляют по размерности огромные и быстро растущие образования, до сих пор не встреченные в эволюции человека. Они влияют на жизнь людей и в положительном и в отрицательном аспекте.

Они по своей сути являются очередным шагом эволюции человеческой популяции в части развития популяционной информационной системы. Базой, источником и аналогом такой информационной системы в природе является генетическая информационная система человека [1].

Положительные прогнозы развития Интернета и ИТ в основном исходят от торговых и финансовых организаций и фирм, базирующиеся на надеждах роста финансовой прибыли. Ряд отрицательных прогнозов исходят от специалистов в области информационных технологий и защиты информации.

Все эти прогнозы [1] базируются на основе статистики по недолговременной истории развития ИТ и Интернета и не учитывают системную популяционную составляющую, которая более важна для эволюции человечества в целом.

Развитие и эволюция информационной системы Интернета сравнима с развитием природной информационной генетической системы человека,

которая по количественным параметрам пока превышает количественные параметры развития ИТ и Интернета.

Однако темпы роста Интернета и его влияния на эволюцию популяции человека заставляют анализировать и прогнозировать его развитие на основе этой аналогии.

Для оценки влияния Интернета на развитие и эволюцию человека следует проанализировать и сравнить количественные характеристики эволюции информационных систем.

На рис. 1 представлены сравнительные оценки объемов накопленной и хранимой информации, темпов обмена информацией между информационными объектами генетической системы человека, информационной системой человека (условно мозгом человека) и ИТ, ТКС, Интернетом. Объем хранимой информации в Интернете сейчас гораздо меньше информационных систем человека, однако, темп роста объема накопленной информации составляет более чем двукратное ее увеличение в течение года. Темпы роста накопленной человеком информации связаны с ростом общей численности людей на Земле и требуемым ростом объема информации генетической системы человека что, по-видимому и является объективной причиной необходимости использования Интернета в дальнейшей эволюции человечества.

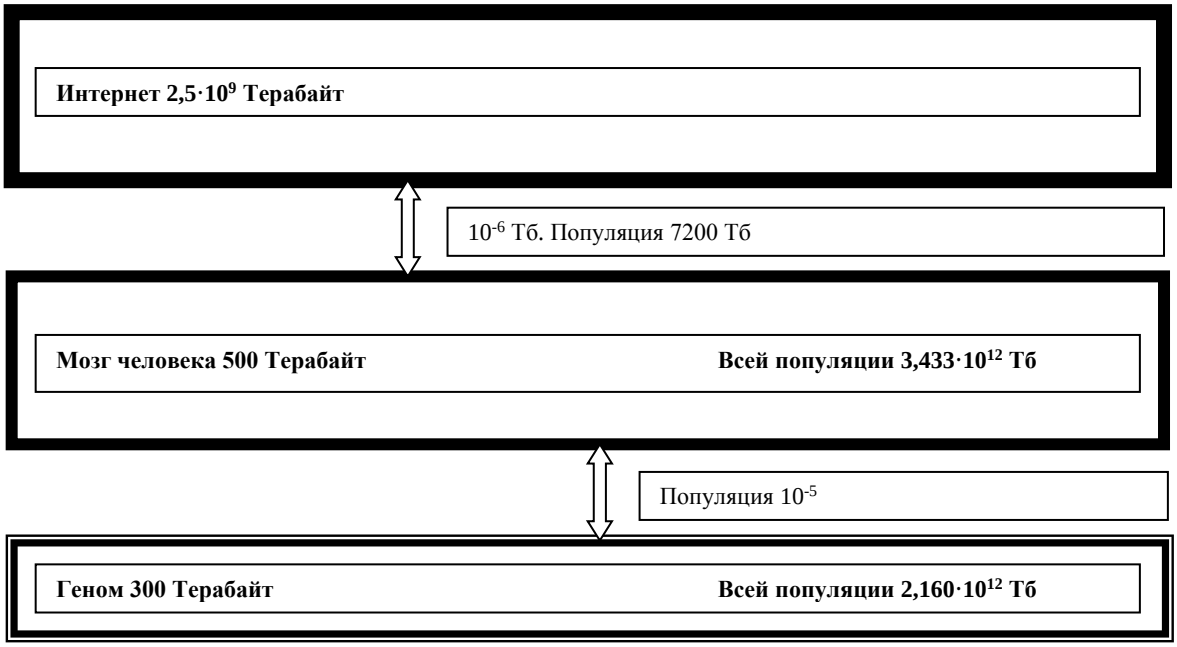



Рис.1. Оценки объемов и скорости обмена информацией между объектами

Часто бытующие представления о том, что информатика и ее развитие не влияют на развитие отдельных людей и человечества в целом, подлежит пересмотру и сравнительному анализу с эволюцией формализованной информационной генетической системы. В настоящее время наиболее существенно то, что человечество переживает демографический переход [2]. Одной из причин достижения демографического перехода роста численности населения мира может являться неспособность накопления и обмена

информационными ресурсами имеющимися способами между членами популяции, что и привело к появлению Интернета и ИТ для продолжения дальнейшей эволюции популяции человека.

На рис. 2 [1] представлена динамика роста численности населения мира по исследованиям Сергея Петровича Капицы (и, соответственно, количественные характеристики информационной генетической системы человеческой популяции). На рис.2 цифрой 1 обозначено мировое население, 2 – режим с обострением, 3 – демографический переход, 4 – стабилизация населения, 5 – древний мир, 6 – средние века, 7 – новая и 8 – новейшая история, стрелка указывает на период чумы – "Черная смерть", кружок – настоящее время, двухсторонняя стрелка – разброс оценок численности населения мира при Рождестве Христовом (Р.Х.). Предел населения $N_\infty$=12–13 млрд.

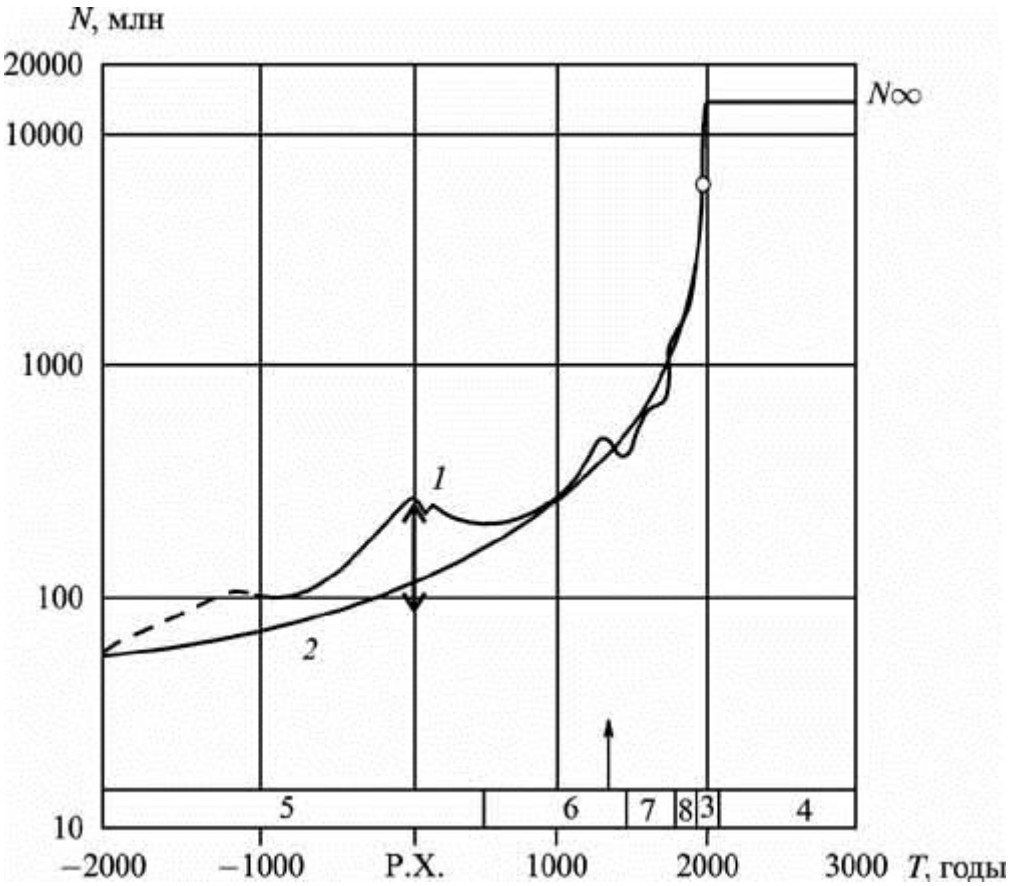



Рис. 2. Население мира от 2000 г. до н.э. до 3000 г.

Эволюция биологической информационной системы длилась 4000 лет [2]. Развитие Интернета и ИТ происходит в течении 50 лет, что примерно в 80–100 раз меньше. По временному параметру сравнение на основе используемой аналогии не проходит. Если с системной точки зрения принять, что число пользователей Интернет пропорционально объему накопленной и циркулирующей информации, то сравнение по численности (информационному объему) человеческой популяции и популяции пользователей Интернет (3–5 млн) показывает, что приближается момент совпадения численности членов обеих популяций.

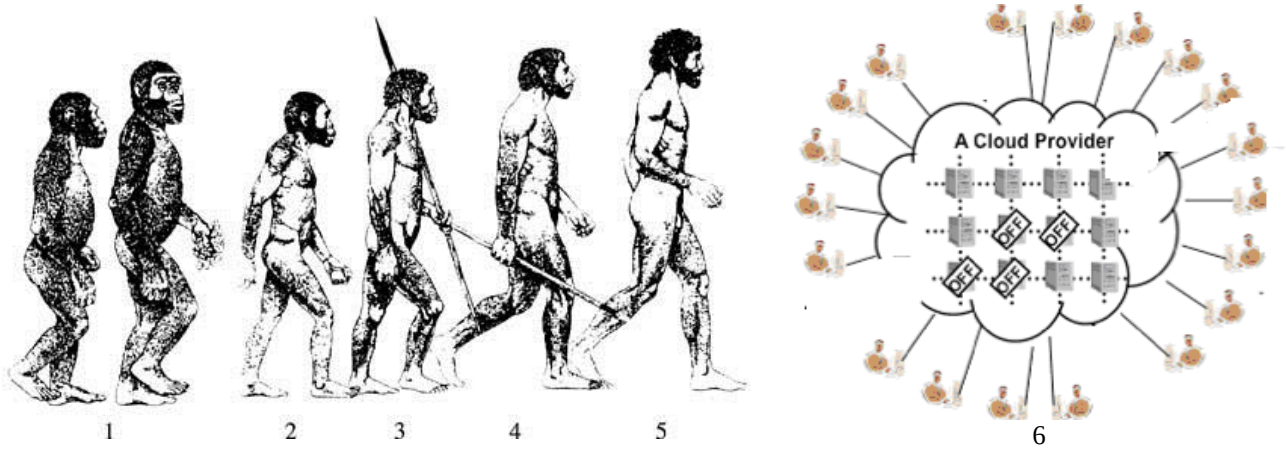
Это позволяет использовать другие параметры сравнения.

Ход кривой роста пользователей Интернета аналогичен ходу кривой роста численности населения. Это позволяет предположить, что предел численности пользователей Интернета естественно будет ограничен численностью населения, т. е. 12–15 млрд.

Этот предел, с учетом изменения и перерасчета временных масштабов, может быть достигнут к 2100 году.

После достижения предела численности пользователей, Интернет и ИТ ожидает «демографический информационный переход», что влечет за собой необходимость поиска новых средств и способов накопления и обмена информацией.

Попытки прогноза развития Интернета и ИТ на основе приведенных данных заставляют предположить, что в антропогенезе человека наступила стадия Humanity Sapiens – человечество разумное (рис. 3), которая характеризуется коллективным наполнением базы данных и знаний и коллективным их использованием.




1 – австралопитек, 2 – Homo Habilis, 3 – питекантроп, 4 – Homo Sapiens (неандерталец), 5 – современный человек, 6 – Humanity Sapiens

Рис. 3. Стадии антропогенеза

С точки зрения эволюции человека, по-видимому следует ожидать поиск и создание средств хранения информации с увеличением объема накапливаемых данных, ускорения и упрощения доступа к ним отдельным членам популяции, обеспечения достоверности данных, исключения вредоносных действий источников информации – интеграции использования информационных ресурсов.

Эта же тенденция, по-видимому будет развиваться в использовании Интернета и ИТ.

Технология и эволюция развития популяций (в том числе Интернета) существенно отличаются от принципов развития отдельных членов популяции [4]. Как показано Эйгеном и Шустером, в эволюции популяций существенны три процесса: мутация (изменение отдельного члена популяции, зависящее от его качества), тиражирование – копирование и размножение члена популяции

(зависит от уровня качества члена популяции), удаление члена популяции (при уменьшении его качества).

Изучение и прогнозирование развития Интернета с позиций развития человеческой популяции наиболее перспективно и полезно и для Интернета, и для человечества в целом. Такой анализ показывает, что дальнейшее развитие Интернета базируется, в первую очередь, на организации механизмов и технологии защиты и безопасности информации (иммунологии ИТ) и внедрении новых видов обмена информацией, отличающихся от существующих достоверностью и качеством.

## Иммунология Интернет и корпоративное представление пользователей

С точки зрения пользователя, Интернет представляет собой огромный комплекс взаимодействующих программ с разнообразными функциями. В то же время, в практике разработок ответственного программного обеспечения сформировался достаточно полный перечень требований, определяющий функциональную безопасность таких ответственных программ. Если оценивать Интернет с этой точки зрения, то это позволит обеспечить его функциональную безопасность для пользователей. Однако, оценить безопасность всего комплекса программ Интернет пока не представляется возможным.

Основные негативные стороны использования Интернета связаны с безопасностью его использования. Несмотря на это, международные стандарты по качеству программного обеспечения Интернет не определяют разницы между безопасностью отдельных программ и Интернета.

Стандартизированные в ISO 9126:1-4:2002 и уточненные в ISO 25010:2011 показатели безопасности не учитывают существенные отличия отдельных программ от их конгломерата в Интернете. Отечественные стандарты по безопасности и защите информации (РД АС и РД СВТ ФСТЭК России) [5, 6] также не содержат различные требования по безопасности и защите информации в зависимости от уровня сложности программного объекта.

Безопасность программного обеспечения в Интернет – очень широкое понятие, включающее экономическую, техническую, экологическую, социальных процессов и многие другие области человеческой деятельности. Это понятие отражает состояние использования комплекса программ Интернета, при котором отсутствует недопустимый риск, связанный с причинением вреда пользователю [2].

При попытке использования этого понятия к комплексу программ Интернет, возникает ряд вопросов.

Интернет – многопользовательский (многосубъектовый) комплекс программ, в котором существуют пользователи и группы пользователей, конкурирующие в части достижения своих целей, иногда противоречащие целям других пользователей или их групп. Часть пользователей преследует зловредные цели по несанкционированному доступу к информации других пользователей.

Что является недопустимым риском при использовании Интернет?

Число атак несанкционированного доступа прогнозируется не менее чем по одной атаке на компьютер в день. Не каждая атака приводит к реализации атаки, но при планомерном исследовании выбранного для атаки компьютера каждая неудавшаяся атака приводит к приближению результативности атаки, то есть к увеличению вероятности несанкционированного доступа.

Рассмотрим комплекс компьютеров из одного миллиона компьютеров. Если все компьютеры из указанного числа не связаны между собой, то потеря одного компьютера не влияет на работоспособность всей системы, вся система в целом достаточно защищена.

Если представить себе комплекс одного миллиона компьютеров, взаимосвязанных в корпоративные сети из 1000 компьютеров, а частота реализованных атак НСД составляет $10^{-6}$, то вероятность НСД к информации к каждому компьютеру в такой системе составляет $10^{-3}$, то есть взломана будет только одна корпоративная сеть, а остальные не пострадают.

Если численность корпоративных сетей достигает уровня 10 млн. компьютеров, то в каждой корпоративной сети появляются несколько взломанных компьютеров, что делает нежизнеспособной всю систему корпоративных сетей в Интернете.

Расчеты показывают, что уже в такой десяти миллионной системе взаимосвязанных компьютеров количество конкурирующих корпоративных сетей численностью более сотни компьютеров составляет более тысячи и при существующей частоте атак НСД взлом превышает допустимые нормы для гарантий безопасной работоспособности корпоративных сетей.

Приведенная оценка безопасности программного обеспечения в Интернет показывает, что нормативные документы по безопасности должны быть доработаны в части учета уровня сложности корпоративных сетей и подходов к построению адекватных систем защиты и безопасности информации.

Постоянно меняющийся состав программ в Интернете и увеличение количества пользователей функционирования Интернета приводит к тому, что невозможно предсказать заранее качество функционирования, и вероятны различные аномалии, завершающиеся отказами, отражающимися на безопасности. Необходимо признать принципиальные трудности аналитического оценивания и прогнозирования значений функциональной безопасности Интернета вследствие непредсказуемости проявления и последствий действия угроз безопасности. Это приводит к практической невозможности достоверных априорных аналитических расчетов функциональной безопасности Интернета [2, 3, 4].

Безопасность Интернета в большинстве случаев определяется не только факторами причинения вреда пользователю, но и возможностью реализацией этих факторов, то есть Угрозами безопасности.

Угрозы безопасности с точки зрения используемых программных продуктов определяются их уязвимостью – наличием в их конструктивной реализации мест и возможностей реализации угроз безопасности [11, 12].

Одними из таких часто используемых угрозами безопасности мест уязвимости является мертвый код.

## Мертвый код

Рассмотрим небольшой пример, на рис. 4 изображена схема, моделирующая бизнес-процесс обработки кредитной информации [9].

Для осуществления последнего действия нам необходимо на основе полученной информации выбрать минимальную ставку по кредиту (рис. 5).

Рассмотрим ситуацию, когда выбор происходит из трех вариантов параллельно другим процессам (то есть структура проверки условий должна быть последовательной, чтобы это не повлияло на другие действия).

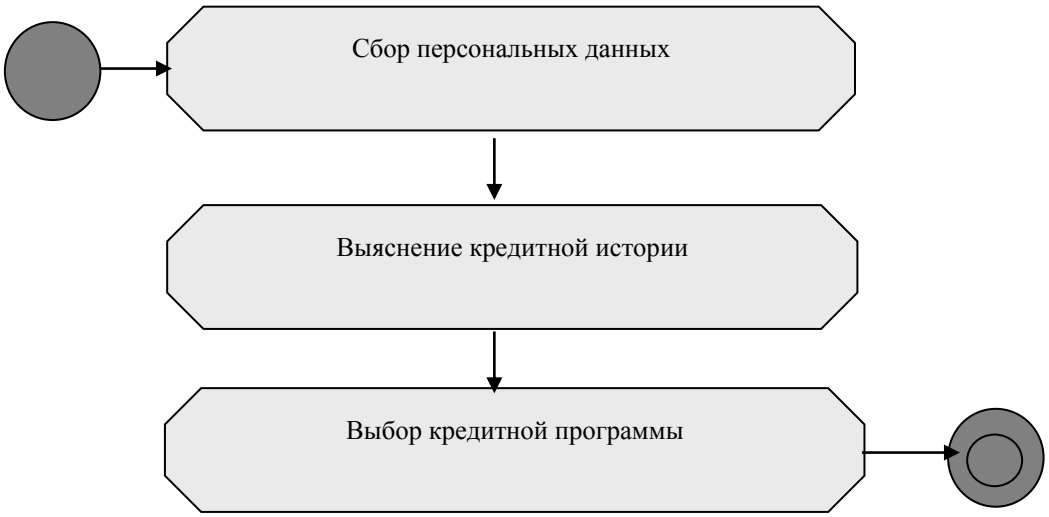



Рис. 4. Сбор данных

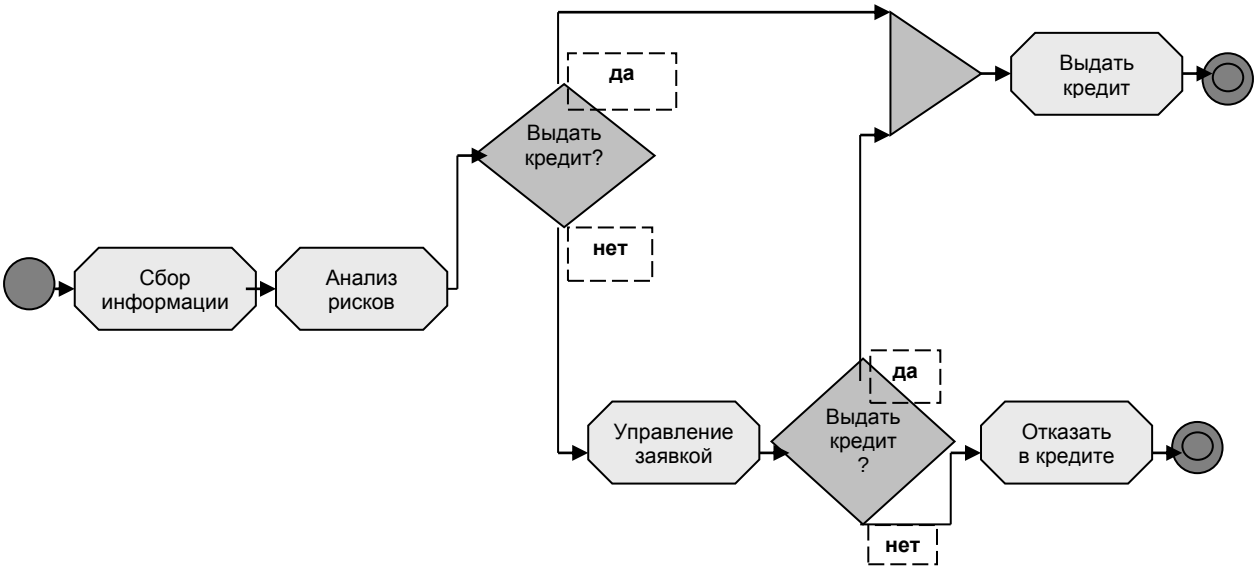



Рис. 5. Выбор кредитной программы

Пусть условие α: $x_1 < x_2$, β: $x_2 < x_3$, а γ: $x_1 < x_3$. Так же особо обговорено, что $x_1 \neq x_2$, $x_1 \neq x_3$ и $x_2 \neq x_3$ (так как мы рассматриваем программы кредитования и при равенстве ставок не имело бы смысла уделять внимание возможности выбора из нескольких вариантов). Результаты обозначим: $\lambda_1$: $x_1$ – минимальное значение, $\lambda_2$: $x_2$ – минимальное значение и $\lambda_3$: $x_3$ – минимальное значение. Тогда при их последовательной проверке мы придем к тому, что в некоторых случаях существуют такие пути, прохождение которых невозможно в силу несогласованности условий (рис. 6).

Из примера следует, что неисполняемая ветвь, которая впоследствии приведет к возникновению «мертвого кода» в тексте программы, может появиться на этапе формирования логической структуры, а это значит, что данную уязвимость следует распознавать именно на этом этапе, а не при формировании и тестировании кода, как принято считать.

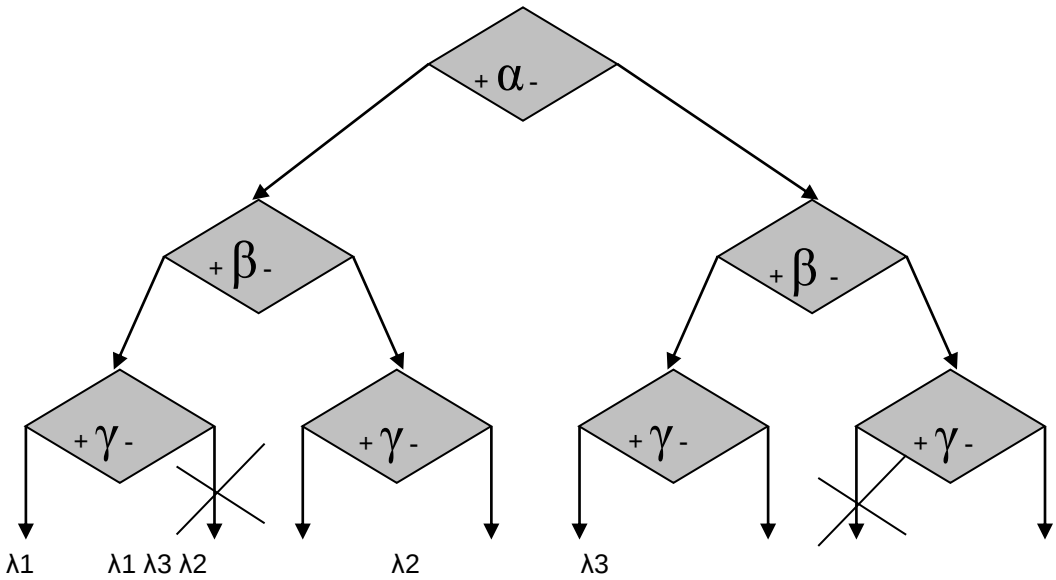



Рис. 6. Тупиковые пути при несогласованных условиях

Анализ объемов мертвого кода и, соответственно, уязвимостей программного обеспечения показывает, что рост объемов мертвого кода происходит с ростом объемов создаваемого программное обеспечение (ПО). При этом промышленное программное обеспечение, создаваемое с использованием инструментальных технологических средств промышленной технологии создания ПО, содержит еще большие объемы мертвого кода в связи с дополнительным внесением мертвого кода инструментальными технологическими средствами. Оценочный график роста объемов мертвого кода в зависимости от объемов разработки ПО приведен на рис. 7.

## Структура корпоративного объединения пользователей в Интернет

Корпоративная сеть в теории защиты информации является временным объединением субъектов с единой целью оптимизации организации контроля над ресурсами, на которые претендуют также другие корпорации и субъекты, не входящие в рассматриваемую корпорацию. Формой объединения субъектов в корпорацию является использование единых для корпорации формальных

обозначений внешних объектов, то есть единого языка и наличие единой системы обмена информацией [9, 10]. В условиях существования достаточно большого числа возможных корпораций и вероятного их пересечения, сама информация становится ценным ресурсом, влияющим на текущее распределение контроля конкретных субъектов над использованием внешних ресурсов, и появлением конкуренции между корпорациями и субъектами за это распределение и стремления несанкционированного доступа к внутрикорпоративной информации со стороны других корпораций и субъектов. Указанный фактор приводит к одной из целей внутрикорпоративной информационной системы – организации защищенного обмена информацией, и к организации защищенного языка корпорации. Защищенность языка корпорации определяется, в первую очередь, защищенностью распределения ключевой информации, а также контролем и поддержанием защищенности ключевой системы во времени, то есть к контролю субъектами корпорации целостности корпорации.

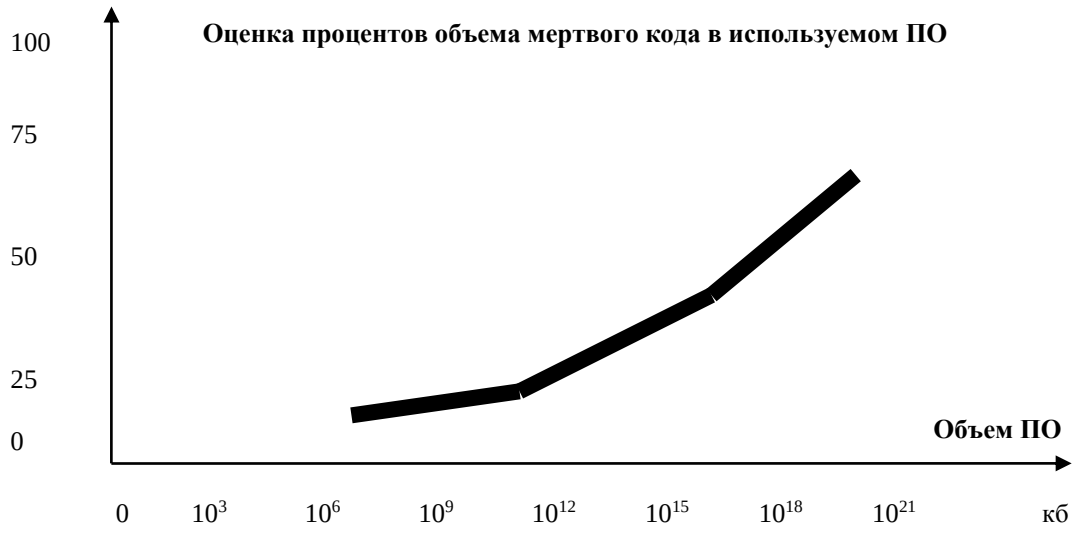



Рис. 7. Оценка объемов мертвого кода

Защищенные корпоративные сети образуются при помощи передачи контрольной информации между субъектами, которая бывает четырех видов: присоединение к корпорации (образование новых субъектов) и межкорпоративные взаимодействия (рис. 8).

Образование нового субъекта-члена корпорации – стрелка сверху вниз.

Образование членом корпорации нового субъекта – стрелка вниз.

Подключение внешним субъектом внутрикорпоративного субъекта к своей корпорации – стрелка слева направо.

Подключение членом корпорации внешнего субъекта – стрелка вправо.

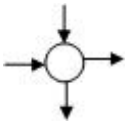


Рис. 8. Обозначение субъектов (членов корпорации) и их виды связей.

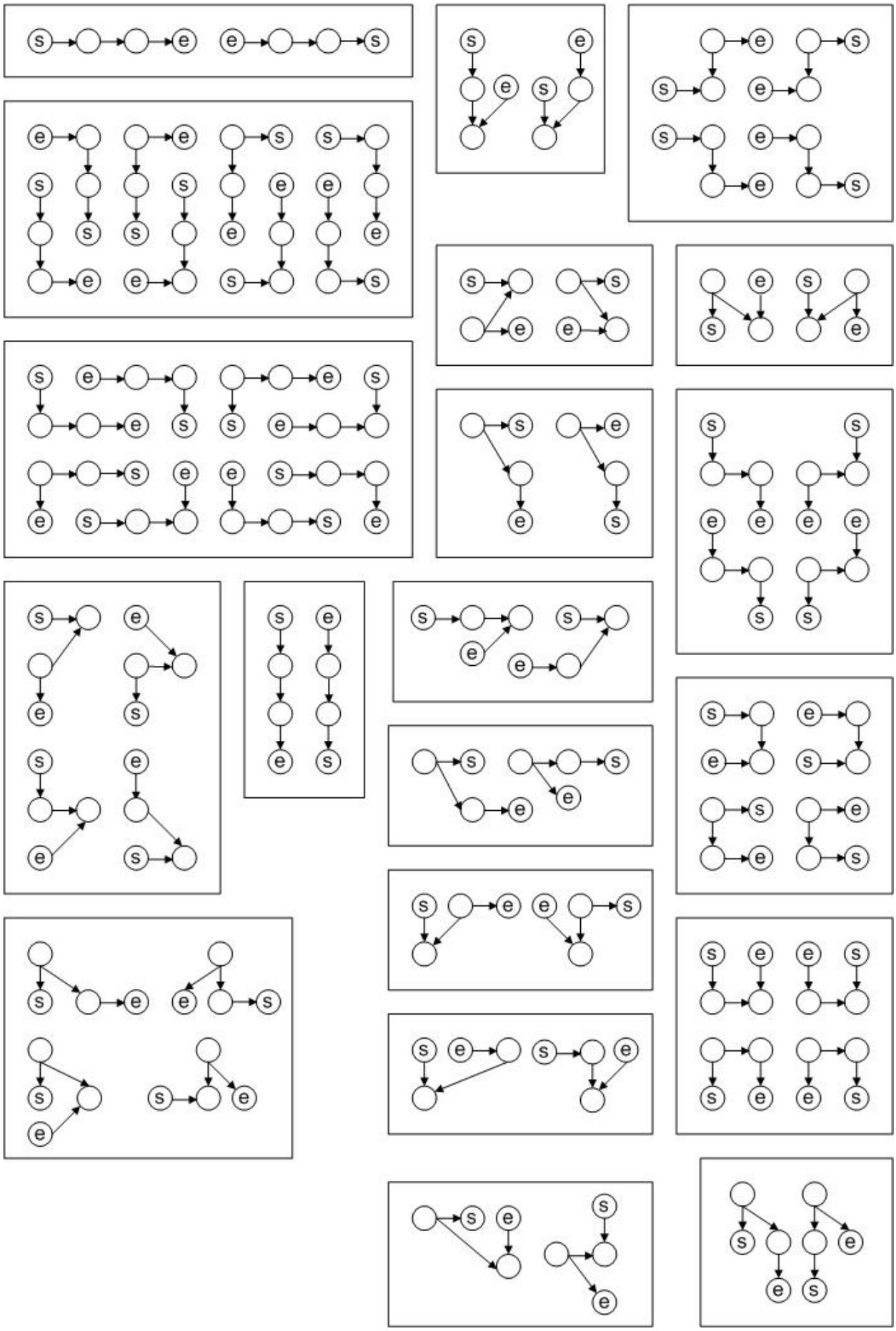


Рис. 9. Варианты блокирования 4-х субъектов корпорации тремя связями,

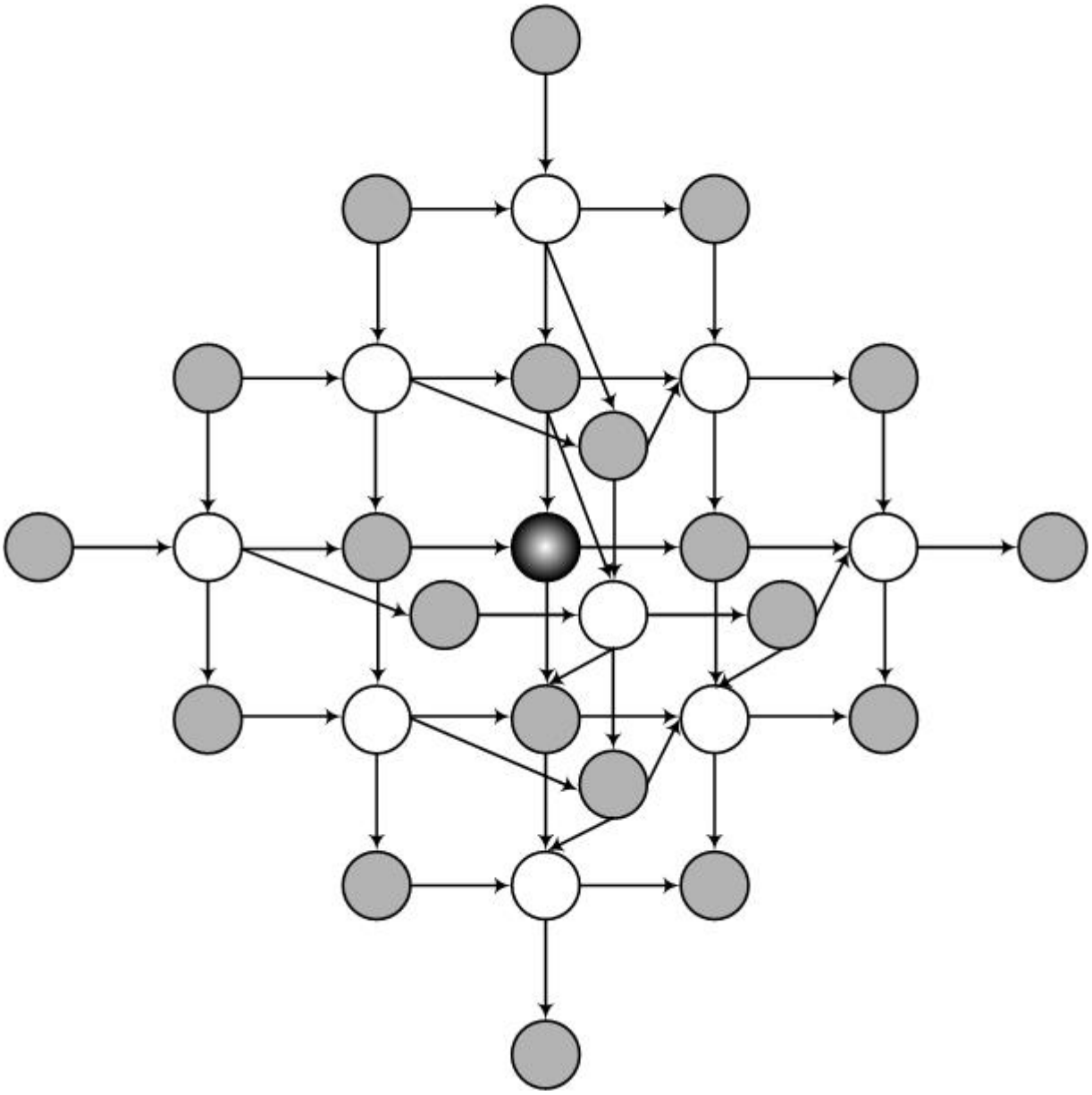


Рис. 10. Другой способ представления элементарных структур для описания ключевой системы, в результате которого возникают двадцать возможных положений оппонента, с которым субъект может быть связан тремя связями, обеспечивающими оптимальную защищенность ключевой системы между двумя субъектами S и E.

Защищенность всех возможных соединений (защищенность ключевой системы) между субъектами внутри корпорации и внешних соединений определяется степенью близости субъектов по параметру порождения ключевой системы субъектов. При возникновении обмена информацией между двумя субъектами возникает вопрос об определении их степени близости относительно друг друга. Для этой цели можно использовать набор связей, которые их логически объединяют, но такой подход не позволяет характеризовать степень близости субъектов, которая определяется всей предысторией развития корпорации. Расчеты показывают, что сравнение блокированных по две связи трех субъектов обладают максимальной близостью и, соответственно, защищенностью ключевой системы по сравнению с другими

видами блокирования по три и более связей для большего количества субъектов. Однако, для корпораций с числом субъектов более десятка, такая оценка не показательна, так как не позволяет провести сравнение близости и защищенности ключевой системы для достаточно удаленных членов корпорации.

При блокировании четырех субъектов с тремя связями возникает $4^3 = 64$ варианта связей, которые могут объединяться в двадцать блоков из соображений симметрии и качественно одинаковых структур по защищенности ключевой системы.

Таким образом, сама информационная сеть может кодироваться (представлена сочетаниями связей) четырьмя элементами, на основе которых для любых двух субъектов могут быть синтезированы цепочки из двадцати видов сочетаний, которыми просто оценивать отношения близости между субъектами.

Необходимо отметить аналогию такого подхода с кодированием белка в живой природе (см. рис. 9, рис. 10) В природе белок состоит из двадцати аминокислот. Каждая аминокислота представлена в составе ДНК в виде триплетов – три нуклеотида, по четыре знаковых вида. То есть триплетов всего 64, но кодируют они 20 аминокислот [7, 8, 9].

Приведенный анализ показывает, что в современных корпоративных системах, насчитывающих тысячи субъектов, определяющим фактором их существования и развития является наличие защищенной системы обмена информацией, базирующейся на эффективной языковой системе с гарантированной защищенностью ключевой системы. Максимальную защищенность на нижнем языковом уровне (уровне системы команд) обеспечивает четырехзначное кодирование триплетов, порождающих 20 видов команд.

Совпадение результатов приведенного анализа со структурой кодирования генетического кода живых организмов показывает, что и для этой корпоративной системы, определяющим фактором системы эффективного кодирования является не помехоустойчивость, а защищенность языковой системы.

## Выводы

Безопасность Интернета как комплекса ответственных программных средств определяется минимизацией уязвимостей используемых программ и степенью защищенности корпоративных сетей, функционирующих на базе Интернета.

## Литература

1. Осовецкий Л. Г., Немолочнов О. Ф., Твердый Л. В., Беляков Д. А. Основы корпоративной теории информации. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004.

2. Кантышев П., Сальманов О., Шляпникова О. Угроза кибертерроризма – это печальная реальность // Ведомости. IT-бизнес. № 3972. 02.12.2015. URL:

http://www.vedomosti.ru/technology/characters/2015/12/02/619223-ugroza-kiberterrorizma.

3. Капица С. П. Общая теория роста человечества: Сколько людей жило, живёт и будет жить на Земле. М.: Наука, 1999.

4. Вернадский В. И. Живое вещество. М.: Наука, 1978. 350 с.

5. Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М.: Мир, 1973. 214 с.

6. Руководящий документ. Автоматизированные системы. Защита от несанкционированного доступа к информации. Классификация автоматизированных систем и требования по защите информации. Решение председателя Гостехкомиссии России от 30 марта 1992.

7. Руководящий документ. Средства вычислительной техники. Защита от несанкционированного доступа к информации. Показатели защищенности и требования по защите информации». Решение председателя Гостехкомиссии России от 30 марта 1992.

8. Карасев В. А. Генетический код: новые горизонты. СПб.: ТЕССА, 2003. 146 с.

9. Твердый Л. В. Метод защищенного распределения управляющих реквизитов СЗИ в межкорпоративных сетях: диссертация ... кандидата технических наук: 05.13.19. СПб: Университет ИТМО, 2008. 105 с.

10. Кукушкин Н. С., Меньшиков И. С., Меньшикова О. Р., Моисеев Н. Н. Устойчивые компромиссы в играх со структурированными функциями выигрыша // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1985. Т. 25. № 12. С. 1761-1776.

11. Осовецкий Л. Г., Торшенко Ю. А. Источники «мертвого кода» при использовании технологии IBM Rational. Научно-Технический Вестник Университета Информационных технологий, механики и оптики. 2008. Т. 8. № 7(52). С. 184-187.

12. Осовецкий Л. Г., Немолочнов О. Ф., Твердый Л. В., Беляков Д. А. Основы корпоративной теории информации. СПб: Издательство СПбГУ ИТМО, 2004.

13. Липаев В. В. Надежность и функциональная безопасность комплексов программ реального времени. М.: Высшая школа, 2013. 207 с.

## References

1. Osovetskiy L. G., Nemolochnov O. F., Tverdyiy L. V., Belyakov D. A. *Osnovyi korporativnoy teorii informatsii* [The Corporate Foundations of Information Theory]. St. Petersburg, ITMO University Publ, 2004 (in Russian).

2. Kantyshev P., Sal'manov O., Shliapnikova O. Ugroza kiberterrorizma – eto pechal'naia real'nost'. *Vedomosti. IT-biznes*, no. 3972, 01.12.2015. Aviliable at: http://www.vedomosti.ru/technology/characters/2015/12/02/619223-ugroza-kiberterrorizma (in Russian).

3. Kapitsa S. P. *Obschaya teoriya rosta chelovechestva: Skolko lyudey zhilo, zhivYot i budet zhit na Zemle* [A General Theory of Growth of Humankind: How

Many People Lived, Lives and will Live on Earth]. Moscow, Nauka, 1999 (in Russian).

4. Vernadskiy V. I. *Zhivoe veschestvo*[Living Matter]. Moscow, Nauka Publ., 1978. 350 p. (in Russian).

5. Eigen M. Selforganization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules. *Naturwissenschaften*, 1971, vol. 58, no. 10, pp. 465-523.

6. *Rukovodyaschiy dokument. Avtomatizirovannyie sistemyi. Zaschita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Klassifikatsiya avtomatizirovannyih sistem i trebovaniya po zaschite informatsii* [Protection against unauthorized access to information. Automated systems classification and requirements for protection of information. Russia Standard]. Reshenie predsedatelya Gostehkomissii Rossii ot 30 marta 1992 (in Russian).

7. *Rukovodyaschiy dokument. Sredstva vyichislitelnoy tehniki. Zaschita ot nesanktsionirovannogo dostupa k informatsii. Pokazateli zaschischennosti i trebovaniya po zaschite informatsii* [Computer equipment. Protection against unauthorized access to information. The security metrics and requirements for data protection. Russia Standard]. Reshenie predsedatelya Gostehkomissii Rossii ot 30 marta 1992 (in Russian).

8. Karasev V. A. *Geneticheskiy kod: novyie gorizontyi.* [Genetic Code: New Horizons]. Saint-Petersburg, TESSA Publ., 2003. 146 p. (in Russian).

9. Tverdyiy L. V. *Metod zashchishchennogo raspredeleniia upravliaiushchikh rekvizitov SZI v mezhkorporativnykh setiakh*. Diss. kand. tehn. nauk [Method of Protected Distribution of Control Details of GIS in Intercorporate Networks. Ph.D. Tesis]. Saint Petersburg, ITMO University Publ., 2008. 105 p. (in Russian).

10. Kukushkin N. S., Men'shikov I. S, Men'shikova O. R.,.Moiseyev N. N. Stable Compromises in Games with Lattice Payoff Functions. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1985, vol. 25, issue 6, pp. 108-116.

11. Osovetskiy L. G., Torshenko Yu. A. Istochniki «mertvogo koda» pri ispolzovanii tehnologii IBM Rational [Sources of "Dead Code" when Using IBM Rational]. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*. 2008, vol.8, no 7(52), pp. 184-187 (in Russian).

12. Osovetskiy L. G., Nemolochnov O. F., Tverdyiy L. V., Belyakov D. A. Osnovyi korporativnoy teorii informatsii [Fundamentals of Corporate Information Theory]. Saint-Petersburg, ITMO University Publ., 2004 (in Russian).

13. Lipaev V. V. Nadezhnost i funktsionalnaya bezopasnost kompleksov programm realnogo vremeni [Reliability and Functional Safety of Software Real-Time Systems]. Moscow, Vyisshaya Shkola Publ., 2013. 207 p. (in Russian).

**Статья поступила 6 декабря 2015 г.**

## Информация об авторе

*Осовецкий Леонид Георгиевич* – доктор технических наук, профессор, лауреат государственной премии совета министров СССР. Советник генерального директора. Ленинградское отделение Центрального научно-исследовательского института связи (ЛО ЦНИИС). Область научных интересов: информационная безопасность, безопасность программных средств. E–mail: leoned.osovetsky@gmail.com

Адрес: Россия, 196128, Санкт-Петербург, ул. Варшавская, 11.

---

## Genome of Informatization and Corporate Immunology of Internet

L. G. Osovetskiy

***Purpose.*** *The security of the Internet as set of software for corporate networks is an actual practical task. The Internet is represented as a joint complex system. The problem of functional safety the Internet as a set of software is studying in the paper. The security of the corporate network and user security affects on the safe of the Internet.* ***The methods used.*** *Factors influencing on the safety of the Internet, highlighted in the paper to assess its functional safety. Among these factors are highlighted - security software for corporate networks and the growth of dead code.* ***The novelty of the work****. Functional safety of Internet is examined from the point of view of safety of complex programs in corporate networks. In paper author used the analogy of development of information technologies with the evolution of the genetic system of humans. In the paper used the analogy of building information and software systems the Internet with the genetic system of living organisms and systems for the security of information - with the immune system of living organisms.* ***Results.*** *In the paper shows that the safety of Internet as set of software is determined by minimization of vulnerabilities of the used software and the level of protection of corporate networks in the Internet. Characteristics and indicators of information security separate software as part of network of the Internet differs considerably. Author offers new software for safe of Internet based on the immune concept of living organisms. Regulatory documents for the information security should consider it.* ***Practical relevance.*** *The results of the paper can be used to build the new complex systems information security of Internet which is based on immune principles of living organisms.*

***Keywords:*** *security, Internet, enterprise systems, threats, vulnerabilities.*

## Information about Author

*Leonid Georgievich Osovetskiy* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Professor, Advisor of CEO of the Leningrad branch of the Central Science Research Institute of Communications (LO CNIIS). Leningrad Branch of Central Science Research Telecommunication Institute (LO ZNIIS). Field of research: information security, security software. E–mail: leoned.osovetsky@gmail.com

Address: Russia, 196128, Saint Petersburg, Varshavskaya str., 11.

УДК 681.513.6

# Информационная технология проектирования систем автоматизированного управления технологическими процессами

Рябцев В. Г., Уткина Т. Ю.

***Постановка задачи:*** *общей чертой всех процессов управления является то, что все они носят информационный характер, поскольку любой процесс для достижения цели требует сбора, обработки и передачи информации. Развитие средств вычислительной техники обеспечивает повышение скорости обработки и обмена информацией, что связано с необходимостью уменьшения времени, отведенного на выполнение транзакций с информационным ресурсом, но, как следствие, повышается интенсивность возникновения сбоев и отказов, происходит потеря информации, что вызывает перерывы в работе систем управления и приводит к техническим и экономическим затратам. В настоящее время остаются нерешенными задачи повышения эффективности процесса построения моделей систем управления за счет совершенствования способов преобразования информации и повышения их надежности за счет адаптации технологических операций к отказам исполнительных механизмов.* ***Целью работы*** *является создание и развитие информационной технологии синтеза моделей автоматизированных систем управления, направленной на сокращение трудоемкости процесса построения моделей за счет усовершенствования способов преобразования информации о системе, и разработка методов повышения надежности за счет адаптации технологических операций к отказам исполнительных механизмов. Для снижения трудоемкости разработки алгоритмов цифровых автоматов предлагается применять структурно-функциональные модели, которые представлены в виде ориентированных графов.* ***Используемые методы*** *основаны на использовании теории графов, алгебры логики, теории цифровых автоматов, системного анализа, технологии проектирования программных систем, сетей Петри, теории надежности и методов технической диагностики.* ***Новизна:*** *элементами новизны представленного решения являются структурно-функциональные модели цифровых автоматов управления исполнительными механизмами, которые позволяют снизить трудоемкость разработки проектов средств управления благодаря преобразованию информации, содержащейся на циклограмме в промежуточную форму, удобную для синтеза цифрового автомата с помощью современных инструментальных средств. Также к элементам новизны стоит отнести функциональную модель адаптации процесса управления к возможным отказам исполнительных механизмов.* ***Результат****: использование структурно-функциональных моделей цифровых автоматов для синтеза алгоритмов систем автоматизированного управления позволяет снизить продолжительность проектирования моделей цифровых автоматов управления фасовочно-упаковочными машинами. Усовершенствованный метод моделирования алгоритмов автоматизированного управления фасовочно-упаковочными машинами обеспечивает прогнозирование последствий неисправностей технологического оборудования еще на этапе отладки алгоритмов, что также снижает трудоемкость поиска и устранения неисправностей.* ***Практическая значимость****: применение предлагаемого решения позволяет уменьшить технологические потери упаковочной тары и фасуемых продуктов, а также улучшить качество выпускаемой продукции за счет сокращения времени нахождения ее без надлежащих условий хранения при ремонте фасовочной машины и сократить расходы предприятия на утилизацию отходов производства. Реализация новой технологии позволяет преобразовывать информацию, содержащуюся на циклограмме, в промежуточную форму, удобную для синтеза цифрового автомата с помощью современных инструментальных средств, оценить альтернативные алгоритмы управления и выбрать наиболее эффективный на этапе проектирования системы без реализации всей системы.*

***Ключевые слова:*** *автоматизированная система управления, информационная технология, технологические операции, цифровые автоматы, структурно-функциональные модели, исполнительные механизмы, циклограмма, фасовочно-упаковочные машины.*

## Актуальность

С развитием новых информационных технологий (ИТ) современные специализированные модели объектов управления служат фундаментом для построения новых методов преобразования информации об автоматизированных системах управления (АСУ). В настоящее время благодаря повсеместной информатизации и компьютеризации ИТ получили особый статус. АСУ широко применяются в областях управления энергетикой, транспортными коммуникациями, правительственными, банковскими системами, промышленным производством и другими объектами. Развитие и распространение данных систем требует создания и развития новых ИТ для синтеза моделей систем управления автоматизированными процессами.

Значительный вклад в развитие методов синтеза моделей АСУ сделали отечественные ученые В.М. Глушков, А.И. Китов, А.А. Красовский, А.М. Ляпунов, А.В. Михайлов, Д.А. Поспелов, В.С. Пугачев, В.С. Семенихин, В.И. Скурихин, В.В. Солодовников, Я.З. Цыпкин и др. [1-3].

Однако в настоящее время остаются нерешенными задачи снижения трудоемкости построения моделей АСУ за счет усовершенствования способов преобразования информации об объекте и повышения их надежности за счет адаптации технологических операций к отказам исполнительных механизмов (ИМ).

Например, в системах автоматизированного управления технологическими процессами (ТП) фасовки и упаковки плодо-молочной продукции применяются ИМ различных типов, которые работают в неблагоприятных условиях окружающей среды: повышенная влажность, запыленность атмосферы, воздействие повышенной температуры, вибрации и т.п. Внешние воздействия могут привести к отказам механизмов, что может быть причиной выпуска бракованной продукции и других негативных последствий. Если в процессе функционирования автоматизированной системы осуществляется фасовка и укупоривание скоропортящейся продукции, то длительные остановки для ремонта механизмов могут привести к порче продукции в таре, с которой не выполнены все технологические операции (ТО). Для исключения негативных последствий, вызванных отказами механизмов, необходима адаптация ТО к отказам механизмов. Такую адаптацию необходимо закладывать еще на этапе проектирования алгоритмов формирования управляющих воздействий.

Информационную модель проектирования АСУ фасовочно-упаковочной машины (ФУМ) можно представить в виде иерархически взаимосвязанных диаграмм IDEF-SADT (Icam DEFinition-Structured Analysis & Design Technique) структурного системного анализа, которые позволяет разбивать первоначальное представление сложной системы на отдельные составные части, при этом детали каждой конкретизируются на следующих диаграммах, описывающих взаимодействие процессов и потоков информации [4].

Одной из наиболее важных особенностей методологии SADT является постепенное введение дополнительных уровней детализации при создании диаграмм, отражающих модель. Модель SADT представляет собой серию

диаграмм, которая разбивает сложный объект на составные части, которые, в свою очередь, представлены в виде блоков, и сопровождаются соответствующей документацией. Детали каждого из основных блоков показаны в виде блоков на других диаграммах. Каждая детальная диаграмма является декомпозицией блока из более общей диаграммы. На каждом шаге декомпозиции более общую диаграмму называют родительской для более детальной диаграммы.

Известны различные методы программной реализации дискретных управляющих автоматов, базирующиеся на эквивалентном аппаратном представлении автомата в виде трех устройств: входного логического преобразователя, памяти и выходного логического преобразователя. При разработке моделей и проектов управляющих автоматов перед проектировщиками возникает сложная задача перехода по техническому заданию, сформулированному технологом, к функциям изменения состояний и выхода автомата [5, 6]. При декомпозиции задачи, когда она представлена иерархией взаимодействующих между собой автоматов, такие функции могут быть получены, минимизированы и реализованы. Но малейшие изменения алгоритма приведут к необходимости повторного решения задачи и к большим затратам на разработку [7, 8].

Сложность решения задачи отмечается всеми специалистами в области промышленной автоматики [5, 9, 10]. Даже используя самый современный промышленный контроллер со специальным языком программирования, например, языком релейно-контакторных схем или булевой алгебры, приходится, прежде всего, сформулировать задачу управления [11-13].

За последние несколько лет производители промышленных программируемых контроллеров пытаются создавать методы интуитивно понятного программирования. Для формулировки задачи применяются циклограммы, сети Петри и графы переходов автоматов [14-16]. Версии языков программирования промышленных контроллеров на основе графов переходов автоматов предлагают фирмы «Шнайдер Электрик», «Сименс», «Фесто» и ряд других. Очевидно, что использование таких языков во встроенных системах управления невозможно из-за отсутствия лицензионных трансляторов и из-за ограничений по быстродействию.

При проектировании алгоритмов работы и программного обеспечения АСУ существует два подхода к решению проблемы взаимодействия инженера-технолога и программиста [7, 10].

*Первый подход* заключается в том, что проектирование выполняется на специализированном языке, что позволяет при минимальном знании программирования и доскональном владении информацией о существующем ТП, создать алгоритм функционирования будущей цифровой системы (ЦС).

*Второй подход* заключается в том, что проектирование поручают программисту, для чего существуют универсальные мощные средства проектирования ЦС [5, 11, 17]. Это позволяет при углубленных знаниях языков

программирования и некоторых знаниях о существующем ТП предприятия, полученных от инженера-технолога, создать алгоритм будущей ЦС.

Однако с одной стороны, программист, мало эрудированный в тонкостях ТП, может допускать ошибки при разработке алгоритма, которые выявляются инженером-технологом, что требует дополнительной доработки и увеличивает время проектирования. С другой стороны, инженеру-технологу не ясны языки программирования и специализированные системы проектирования ЦС, поэтому не стоит ожидать от него создания оптимального алгоритма работы проектируемого устройства.

При проектировании ЦС, осуществляющих управление ТП, остается открытым вопрос выбора метода разработки и отладки алгоритмов управления ИМ. Последовательность включения/выключения ИМ определяется инженером-технологом, а причинно-следственные связи раскрываются с помощью циклограммы работы механизмов, на которой они представлены командами и подкрепляются соответствующими надписями.

Циклограммы по форме графического изображения бывают прямоугольными, линейными или кольцевыми. В прямоугольных циклограммах каждому интервалу перемещения рабочего органа ставится в соответствие свой прямоугольник с основанием, выполненный без учета масштаба.

Для линейных циклограмм характерно, что каждому интервалу перемещения рабочего органа, отмеренному по оси абсцисс, соответствует наклонная линия, а каждому выстою – горизонтальная линия. Иногда у линий наносят поясняющие надписи: «подъем», «опускание», «ход вперед», «выстой снизу» и др.

Однако, информация о причинно-следственных связях между ИМ, которая приведена в циклограмме, не позволяет формализовать процесс синтеза функций переходов и выходов, необходимых для построения моделей цифрового автомата (ЦА). Для отображения всех причинно-следственных связей предлагается применять структурно-функциональные модели ЦА, которые позволяют сократить вероятность возникновения ошибок при дальнейшем синтезе проекта автомата с помощью наиболее распространенных инструментальных средств.

## Постановка задач

**Цель работы** состоит в создании и развитии информационной технологии синтеза моделей автоматизированной системы управления технологическими процессами, направленной на сокращение трудоемкости процесса построения моделей за счет усовершенствования способов преобразования информации о системе и разработке методов повышения надежности автоматизированной системы управления за счет адаптации технологических операций к отказам исполнительных механизмов.

Согласно поставленной цели задачами данной работы являются:

– создание концепции информационной технологии для разработки систем автоматизированного управления технологическими процессами;
– построение структурно-функциональных моделей цифровых автоматов для управления исполнительными механизмами фасовочно-упаковочных машин;
– выбор методов и средств моделирования устройств управления автоматизированных систем на основе цифровых автоматов;
– разработка метода адаптации процесса управления к отказам исполнительных механизмов для обеспечения прогнозирования последствий неисправностей при эксплуатации фасовочно-упаковочных машин.

Для достижения поставленной цели предлагается концепция ИТ разработки систем управления ТП, которая объединяет существующие подходы и устанавливает взаимосвязь между программистом и инженером-технологом посредством создания интерактивной среды разработки. В интерактивной среде разработки отображается циклограмма работы соответствующего механизма или машины, подлежащей автоматизации, и с помощью графического редактора можно наносить в виде нового слоя элементы программирования ЦА, причем работа в интерактивной среде должна вестись совместно инженером-технологом и программистом одновременно [18].

Программист создает соответствующие состояния ЦС, а инженер-технолог сразу же консультирует программиста об условиях срабатывания механизмов, соответствующие данному состоянию, и возможных реакциях на его поломку [18, 19].

Предлагаемая ИТ проектирования АСУ ТП представляет собой платформу проектирования, которая состоит из следующих этапов:

– построение информационной модели АСУ;
– анализ циклограммы работы, построенной инженером-технологом;
– создание структурно-функциональных моделей ЦА управления ИМ;
– получение объединенных таблиц функций переходов и выходов;
– разработка иерархической системной модели ЦА в специализированной среде проектирования, например, Active-HDL;
– создание функциональной модели адаптации процесса управления к возможным отказам ИМ;
– верификация разработанных моделей и генерация соответствующей программы автоматизированного управления ИМ на одном из предложенных текстовых языков описания аппаратуры: VHDL, Verilog или SystemC [20].

Последовательность этапов проектирования АСУ ТП в соответствии с предлагаемой ИТ изображена в виде структурной схемы на рис. 1.

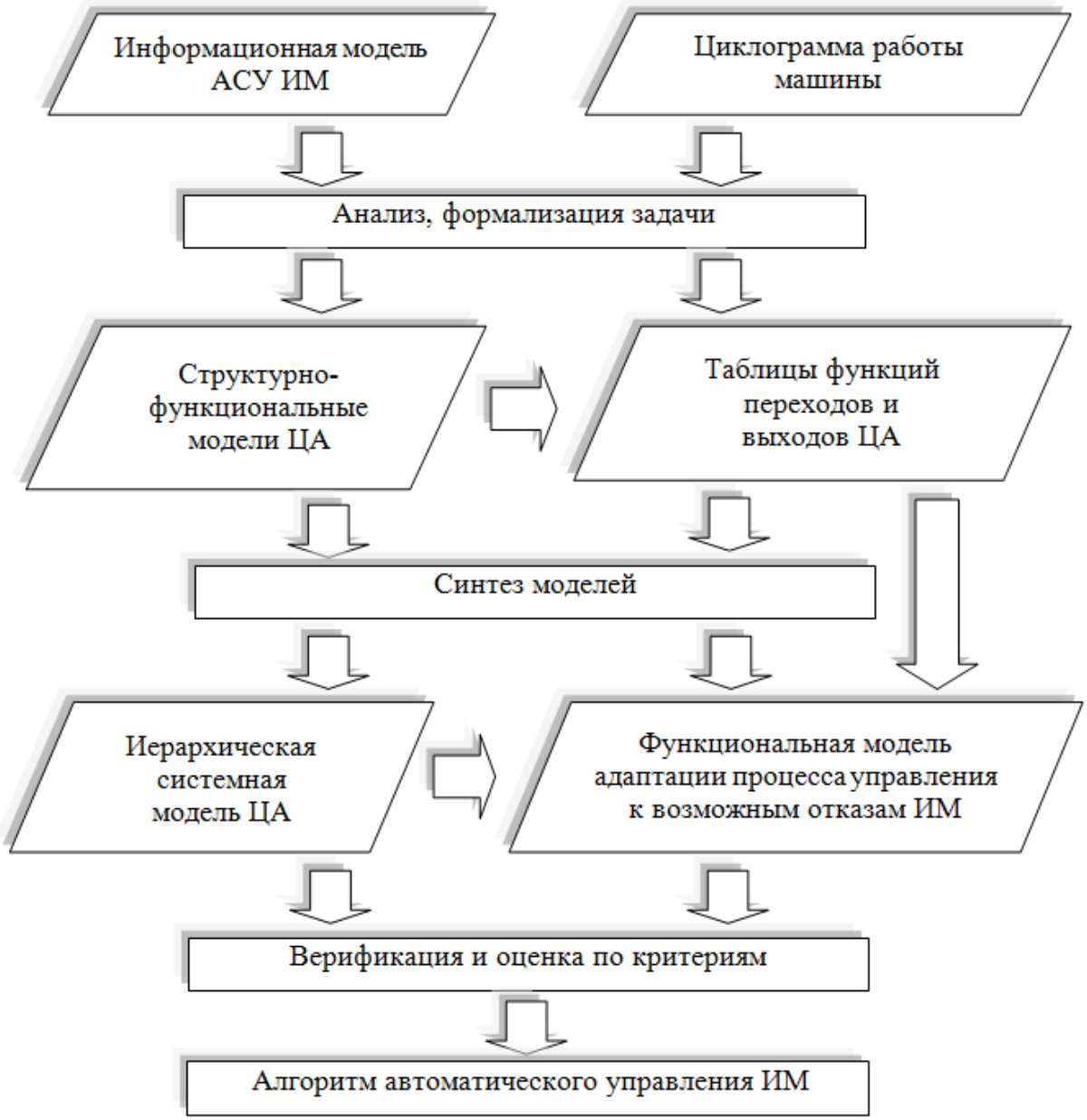



Рис. 1. Этапы проектирования АСУ ТП

Алгоритмы разработки структурно-функциональных моделей конечных автоматов АСУ, которые построены по описанным выше концепциям, показаны на рис. 2.

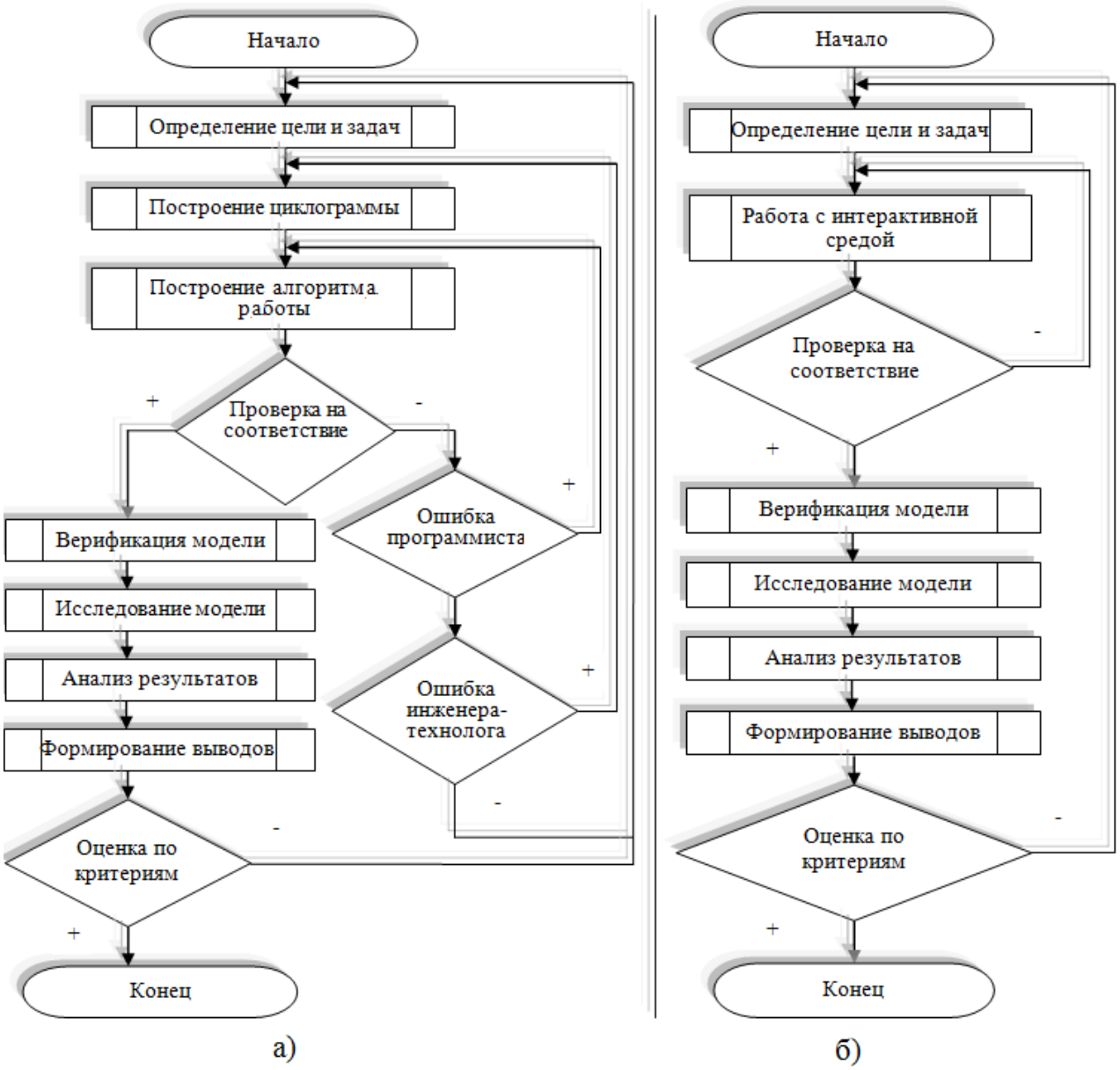
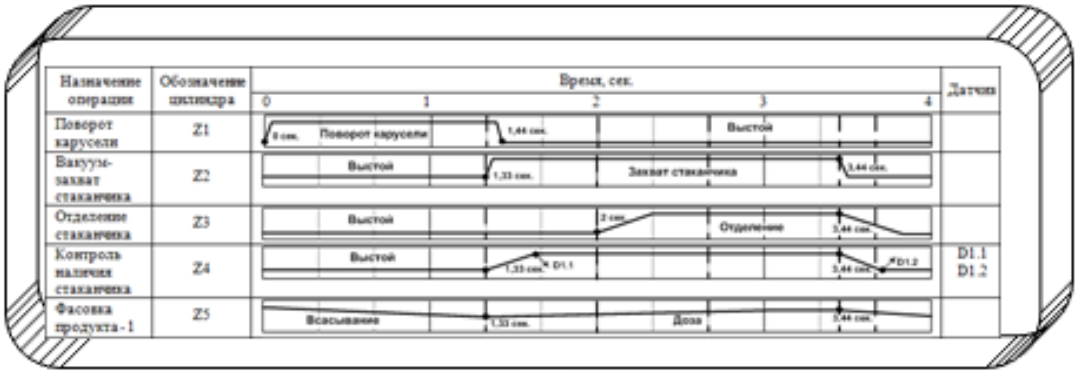



Рис. 2. Алгоритмы проектирования структурно-функциональных моделей конечных автоматов: а) существующий; б) предлагаемый.

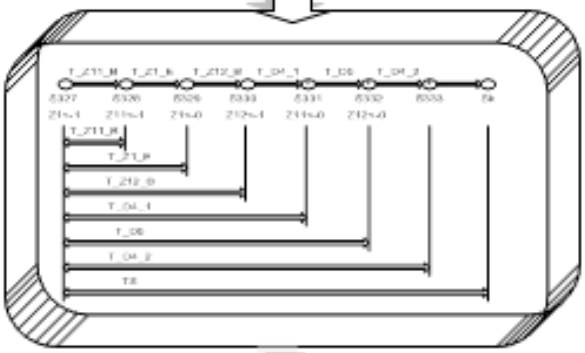
Примеры результатов, получаемых на различных этапах проектирования АСУ ТП, приведены на рис. 3.

По заданной циклограмме проектируются структурно-цифровые модели конечных автоматов, для которых составляются объединенные таблицы функций переходов и выходов, а затем проектируется иерархичная системная модель ЦА.

Циклограмма




Структурно-функциональные модели



Объединенные таблицы функций переходов и выходов

| Состояния | | Условия переходов | Выполняемые действия |
|---|---|---|---|
| текущее | новое | | |
| Entry | S1 | Run = '1' and T = '1' and P = '1' | U <= '0'; Z1 <= '1'; Tm := now; Tb := now; |
| S1 | S1 | (Tm – Tb) < T_Z2_B | Tm := now; |
| | S2 | (Tm – Tb) >= T_Z2_B | Z2 <= '1'; |
| S2 | S2 | (Tm – Tb) < T_Z1_E | Tm := now; |
| | S3 | (Tm – Tb) >= T_Z1_E | Z1 <= '0'; |
| S3 | S3 | (Tm – Tb) < T_Z3_B | Tm := now; |
| | S4 | (Tm – Tb) >= T_Z3_B | Z3 <= '1'; |
| S4 | S4 | (Tm – Tb) < T_Z2_E | Tm := now; |
| | S5 | (Tm – Tb) >= T_Z2_E | Z2 <= '0'; |
| S5 | S5 | (Tm – Tb) < T_Z3_E | Tm := now; |
| | S6 | (Tm – Tb) >= T_Z3_E | Z3 <= '0'; |
| S6 | S6 | (Tm – Tb) < T_sum | Tm := now; |
| | Exit | (Tm – Tb) >= T_sum | |

Иерархическая системная модель

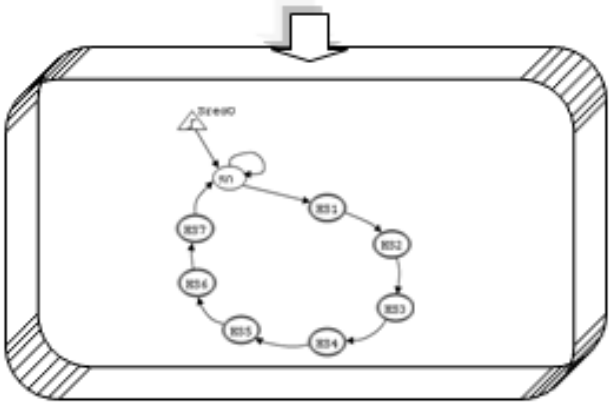


Рис. 3. Результаты проектирования, полученные на различных этапах

## Структурно-функциональные модели цифровых автоматов для управления исполнительными механизмами

Цель управления состоит в том, чтобы объект управления (ОУ) в условиях реальной эксплуатации обеспечивал выполнение заданных функций [1, 21]. Состояние объекта определяется одним или несколькими рабочими параметрами $Y(t)$. В качестве рабочих параметров выступают физические величины: температура, давление, скорость линейная или вращательная, напряжение электрического тока и др. Кроме того, на ОУ оказывают влияние внешние воздействия $Z(t)$ (рис. 4), которые называют возмущениями. Такие действия вызывают изменение внутреннего состояния объекта и, как следствие, рабочих параметров. Поэтому необходимо организовывать поступления управляющих воздействий $U(t)$ на ОУ для выполнения им рабочих функции по заданным алгоритмам. Данные алгоритмы предусматривают поддержку рабочих параметров постоянными во времени или изменение их по определенному известному закону.

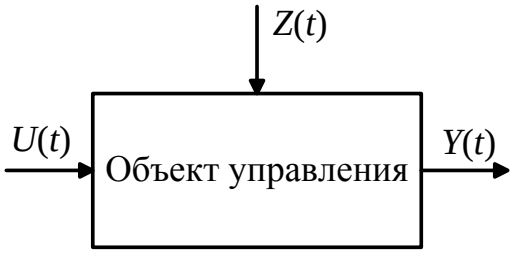



Рис. 4. Структурная схема объекта управления

Можно определить основные требования к АСУ фасовки и упаковки продукции: высокие быстродействие и точность формирования управляющих воздействий, с целью обеспечения большей надежности, высокая помехоустойчивость каналов передачи сигналов и невысокая стоимость оборудования.

Циклом механизма ФУМ называется совокупность движений и остановок (состояний) всех его элементов. Цикл рабочего органа – это совокупность всех его состояний, которые составляют круговорот в течение некоторого промежутка времени, который называется временем цикла [21, 22].

Циклы рабочих органов, управляемых с помощью исполнительных органов циклического действия, как правило, состоят из следующих перемещений и остановок:

$t_p$ – время движения рабочего органа в направлении выполнения ТО, так называемого рабочего хода или рабочего перемещения;

$t_{o.\,p}$ – время остановки рабочего органа после выполнения операции;

$t_x$ – время движения рабочего органа к первичному местоположению (исходному), так называемого холостого хода или холостого перемещения;

$t_{o.\,x}$ – время нахождения рабочего органа в исходном положении.

Время кинематического цикла рабочего органа (механизма) является суммой времени всех его состояний и рассчитывается по формуле:

$$T_k = t_p + t_{o.p} + t_x + t_{o.x}.$$

Для осуществления заданного ТП необходимо, чтобы рабочие органы машины двигались с определенными скоростями и ускорениями, а их перемещение образовывали определенную последовательность, которая требуется.

Пример выполнения технологических операций фасовки и упаковки продукта на ФУМ Пастпак-Р2 [23] для зерненного сыра приведен на рис. 5.

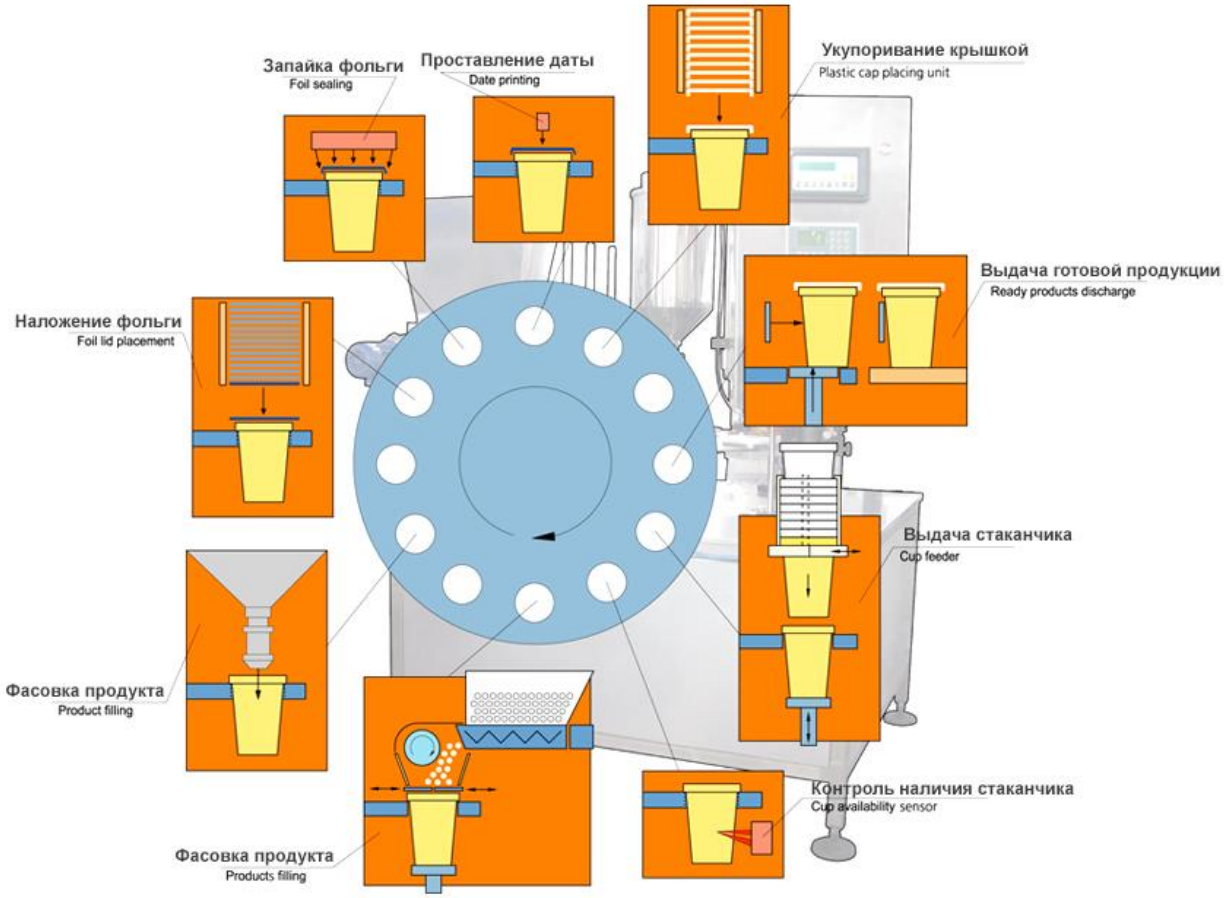



Рис. 5. Операции фасовки и упаковки продукта на ФУМ карусельного типа

Графическое изображение последовательности перемещений и остановок рабочих органов машины называется цикловой диаграммой (циклограммой). Циклограмма ФУМ отображает состояния всех ее рабочих органов.

Циклограмма работы ИМ ФУМ Пастпак-Р2 для зерненого сыра приведена на рис. 6.

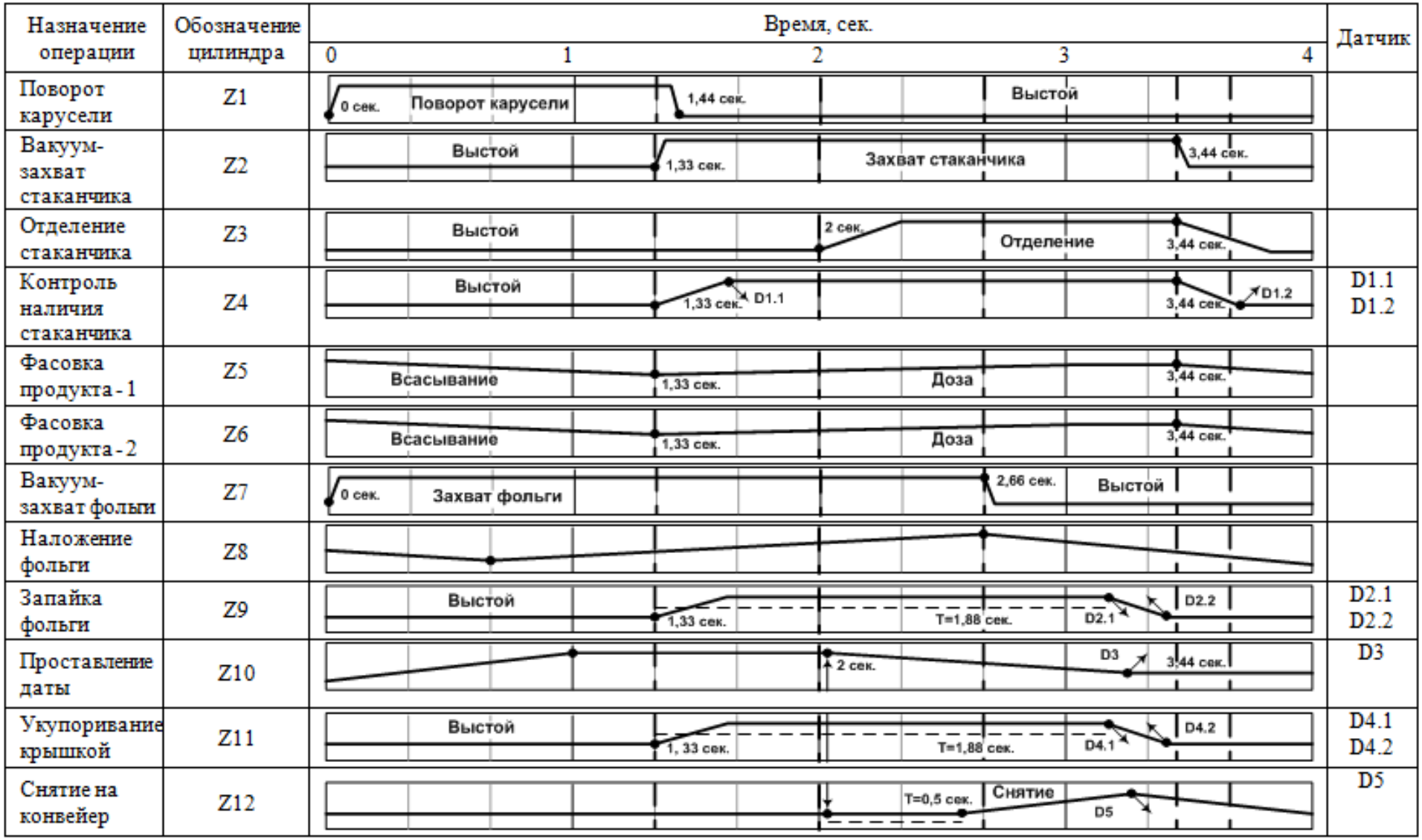



Рис. 6. Циклограмма работы исполнительных механизмов ФУМ Пастпак-Р2

Начало и конец перемещения рабочих органов в пределах кинематического цикла определяют по циклограмме машины. Отсчет времени ведется с момента начала рабочего хода ведомого звена ФУМ, принятого за основной. Рекомендуется в качестве основного выбирать механизм, который выполняет наиболее длительную или трудоемкую ТО или первую по порядку в ТП.

Линиями со стрелками на циклограмме обозначена передача управления, а именно причинно-следственные связи между командами ИМ.

ФУМ Пастпак-Р2 представляет собой автомат роторного типа для фасовки в пластиковую тару продукта рассыпчатой структуры, который требует бережного дозирования, с последующим наложением и запайкой фольги, проставлением даты и укупоркой пластиковой крышкой.

ТП фасовки продукта на ФПМ Пастпак-Р2 для зерненного сыра состоит в следующем. Отделитель стаканчиков отделяет стаканчик от общей стопки в кассете стаканчиков, а переносчик стаканчиков вакуум-захватом опуская его вниз и устанавливает в одно гнездо операционного ротора. Наличие стаканчика контролируется соответствующим датчиком наличия. Дозатор-1 выдает заданную порцию сыра. Дозатор-2 выдает заданную порцию сливок. Вакуум-захвата механизма подачи фольги отделяет фольгу от общей стопки в кассете фольги и, обернувшись на 180°, накладывает ее на верхний борт стаканчика. При соответствующей температуре происходит запайка фольги. Маркер, опускаясь вниз, наносит дату на фольгу. Механизм укупорки крышек надевает крышку на верхней борт стаканчика, образующей вместе с бортом крышки замок. Стаканчики с продуктом выталкивателем поднимаются вверх и съемником стаканчиков подаются на конвейер, который отводит их от машины [23, 24].

Выполнение ТО возможно только, если давление сжатого воздуха в пневмосистеме находится в диапазоне 0,6 ± 0,02 МПа, а температура сварки не ниже допустимой.

На циклограмме видно, что первой операцией является поворот карусели на 130°, но для активизации данной операции необходимо соблюдение условия:

$$Run = '1' \wedge P = '1' \wedge T = '1',$$

где $Run$ – сигнал пуска;

$P$ – состояние индикатора давления в пневмосистеме;

$T$ – состояние индикатора температуры термосваривания.

Далее активизируются механизмы вакуум-захвата стаканчика, отделение стаканчика. Следующая позиция ФУМ отвечает за контроль наличия стаканчика на позиции, который осуществляется с помощью соответствующего сенсора, при этом, если датчик $D1.1 = '1'$, то это свидетельствует о начале ТО, а датчик $D1.2 = '1'$ соответственно сигнализирует о ее завершения. На позиции дозирования механизм подъемника подводит стаканчик к дозатору, происходит наполнение его сыром до срабатывания тензодатчика, после чего заслонки закрываются, стаканчик опускается и перемещается дальше на позиции заливки сливок, наложения и запайки фольги, проставление даты и т.д. За правильность выполнения этих операций отвечают датчики положений $D2.1, D2.2$,

D3, D4.1, D4.2, D5. Продолжительность активного состояния большинства ИМ, указывается на циклограмме, исключением является пневмоцилиндр Z12, который отвечает за перемещение стаканчика на приемный столик, так как для выполнения этой ТО достаточно лишь прикосновения к стаканчику для его снятия с карусели.

Разработка алгоритмов управления ФУМ является трудоемкой процедурой, ее можно выполнять на реальных механизмах в режиме автоматизированного управления, однако это приведет к значительным потерям времени, фасуемого продукта и тары, а в ряде случаев может привести к неисправностям ИМ или травматизму обслуживающего персонала. Таким образом, актуальной является задача разработки и исследования структурно-функциональных моделей ФУМ и ИТ для синтеза, анализа и оптимизации алгоритмов автоматизированного управления ИМ автоматизированной фасовки и упаковки плодо-молочной продукции.

Последовательность включения и отключения механизмов определяется технологом, а причинно-следственные связи между командами указываются на циклограмме. Однако информацию, представленную в специфической форме, необходимо преобразовать в форму, удобную для разработки алгоритмов, и отладки программного кода управляющего контроллера, реализованного в виде ЦА [18, 25].

Приведем основные определения, которые необходимы для разработки ИТ проектирования структурно-функциональных моделей конечных автоматов ФУМ и структурно-функциональных моделей ЦА управления ИМ.

**Определение 1**. Положительный фронт ТО представляет собой процесс последовательного включения ИМ, которые параллельно выполняют ТО в соответствии с заданным ТП на позициях, расположенных по направлению рабочего хода или перемещения карусели ФУМ.

**Определение 2**. Отрицательный фронт ТО представляет собой процесс последовательного выключения ИМ, которые параллельно выполняют ТО в соответствии с заданным ТП на позициях, расположенных против рабочего хода или перемещения карусели ФУМ.

**Определение 3**. Рабочий цикл ФУМ представляет собой последовательность всех ТО на всех позициях карусели ФУМ, выполняемых параллельно, в соответствии с заданным ТП.

Для снижения трудоемкости разработки алгоритмов ЦА предлагается применять его структурно-функциональную модель, которая представлена в виде ориентированного графа переходов $G = (S, A)$, вершины которого расположены на оси времени, причем положение каждой вершины $S_i$ относительно начальной вершины $S_1$ определяется интервалом времени $T_i$, $i = \overline{2, k}$, где $k$ – число вершин графа [25].

Смежные вершины графа $(S_1, S_2), (S_2, S_3), \ldots, (S_{k-1}, S_k)$ соединены дугами, ориентированными по направлению возрастания оси времени.

Граф переходов $G = (S, A)$ обладает следующими свойствами:

а) граф не содержит параллельных дуг;
б) в множестве вершин графа выделена одна вершина $S_1$, которая называется входом графа;
в) в множестве вершин графа выделена одна вершина $S_k$, которая называется выходом графа;
г) каждая вершина графа $S_j$, $j=\overline{1,k-1}$ достигает выхода $S_k$.

Множество вершин графа переходов включает в себя два подмножества вершин $S \subset (S_w, S_c)$. Первое подмножество вершин $S_w$ соответствует состояниям, в которых выполняются операции формирования управляющих сигналов $W_i$ на включение и выключение ИМ $Z=\{Z_1, Z_2, \ldots, Z_m\}$. Второе подмножество вершин $S_c$ соответствует состояниям, ЦА, в которых осуществляются операции сравнения текущего модельного времени $T_m$ с заданными моментами на оси времени, а также при помощи множества датчиков $D=\{d_1, d_2, \ldots, d_k\}$ контролируются конечные состояния ИМ. Состояния контроля положения ИМ в заданные моменты времени обозначаются на графе переходов символом «⊕».

Структурно-функциональная модель ЦА, управляющего операциями первого цикла возрастающего фронта, для ФУМ Пастпак-Р2 карусельного типа приведена на рис. 7. Данный автомат управляет двумя механизмами и имеет 7 состояний.

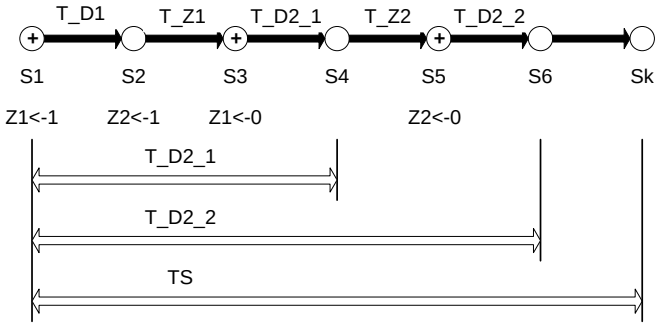



Рис. 7. Модель автомата, управляющего первым циклом операций

Состояние $S_1$ является входом графа, $S_k$ является выходом графа. Дуги графа переходов нагружены интервалами времени, продолжительность которых задается технологом на соответствующей циклограмме.

В состояниях $S_1$ и $S_2$ включаются ИМ Z1 и Z2 соответственно. В состояниях, отмеченных знаком «⊕», обеспечивается контроль выполнения условий переходов. В состояниях $S_4$ и $S_6$ контролируется моменты срабатывания датчиков D2.1 и D2.2 соответственно. В состояниях $S_3$ и $S_5$ выключаются ИМ Z1 и Z2 соответственно. Общая продолжительность полного цикла работы ЦА равна $S_k$.

Структурно-функциональная модель цифрового автомата, управляющего тремя механизмами второго цикла возрастающего фронта операций, приведена на рис. 8.

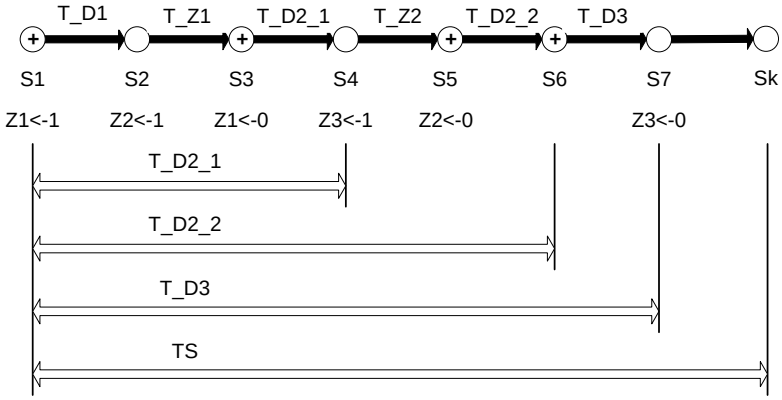



Рис. 8. Модель автомата, управляющего вторым циклом операций

На состояния автомата влияют три временных параметра, определяющие моменты срабатывания датчиков D2.1, D2.2 и D3. Автомат переходит в конечное состояние $S_k$ после достижения модельным временем значения TS.

На структурно-функциональной модели ЦА, приведенной на рис. 9, показаны состояния для управления операциями третьего цикла возрастающего фронта операций.

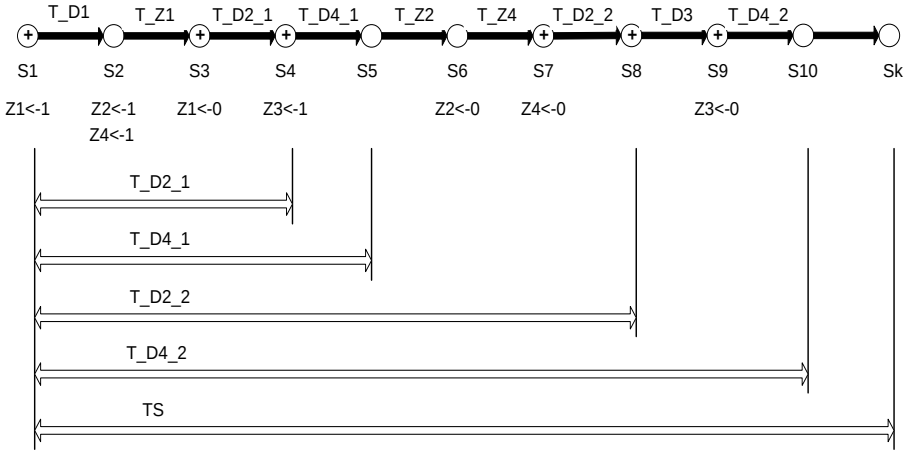



Рис. 9. Модель автомата, управляющего третьим циклом операций

Данный автомат управляет четырьмя механизмами, а контроль их положений осуществляет набор датчиков D2.1, D2.2, D3, D4.1 и D4.2. Если в состояниях, отмеченных символом «⊕», не выполняются условия переходов, то происходит аварийный останов системы управления.

На рис. 10 приведена структурно-функциональная модель ЦА, управляющего операциями четвертого цикла возрастающего фронта операций.

Модель данного автомата содержит 13 состояний, автомат управляет 5 механизмами, для контроля состояний которых применяются 6 датчиков. Аналогичные модели можно составить для всех циклов возрастающего фронта ТО.

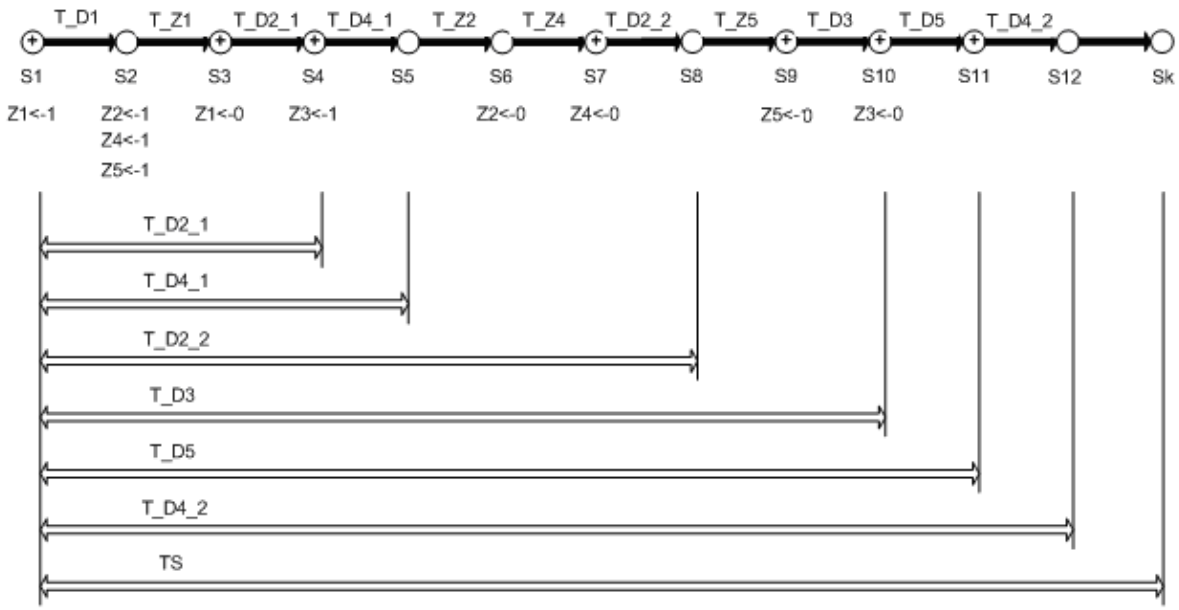



Рис. 10. Модель автомата, управляющего четвертым циклом операций

Как видно из рис. 7-10, с увеличением количества применяемых механизмов сложность ЦА увеличивается.

Для определения эффективности ИТ проектирования структурно-функциональных моделей конечных автоматов был проведен эксперимент, который заключался в проведении проектирования моделей ЦА управления ФУМ Пастпак-Р2 для фасовки зерненого сыра с применением разработанной технологии и без ее применения [23].

Результаты проведенного эксперимента по проектированию конечных автоматов для синтеза алгоритмов автоматизированного управления ТП ФУМ, управляющей возрастающим фронтом ТО, соответствуют данным, представленным в таблице 1.

Таблица 1 – Продолжительность проектирования для положительного фронта ТО

| Номер цикла | Количество состояний | Время проектирования, мин. | |
|---|---|---|---|
| | | без применения ИТ | с применением ИТ |
| 1 | 6 | 20 | 15 |
| 2 | 10 | 34 | 27 |
| 3 | 12 | 42 | 34 |
| 4 | 14 | 50 | 41 |
| 5 | 16 | 58 | 50 |
| 6 | 18 | 71 | 58 |
| 7 | 21 | 88 | 69 |
| 8 | 24 | 110 | 83 |
| 9 | 27 | 133 | 91 |
| 10 | 29 | 152 | 100 |
| Всего | 177 | 758 | 568 |

Зависимости продолжительности проектирования моделей ЦА ФУМ, управляющих возрастающим фронтом ТО, без и с применением новой технологии представлены на рис. 11.

Выполним расчет средней продолжительности проектирования модели ЦА ФУМ, управляющей положительным фронтом ТО, без и с применением разработанной ИТ.

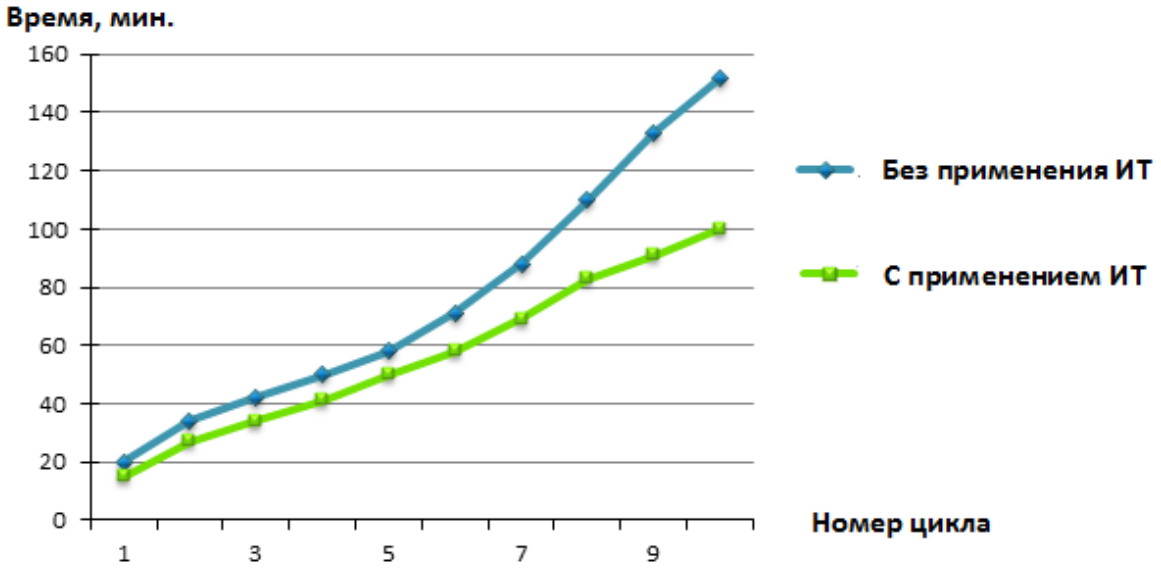



Рис. 11. Графики зависимостей продолжительности проектирования от сложности моделей

Средняя продолжительность проектирования моделей ЦА ФУМ без применения предлагаемой ИТ:

$$T_{ср_ИТ} = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_i}{n} = \frac{758}{177} \approx 4{,}282 \text{ мин.},$$

где $n$ – количество состояний ЦА.

Средняя продолжительность проектирования моделей ЦА ФУМ с применением предлагаемой ИТ:

$$T_{ср_без_ИТ} = \frac{\sum_{j=1}^{n} T_j}{n} = \frac{568}{177} \approx 3{,}209 \text{ мин.}$$

Таким образом, применение предложенной ИТ проектирования структурно-функциональных моделей конечных автоматов для синтеза алгоритмов автоматизированного управления ТП позволяет на 30,15 % уменьшить продолжительность проектирования.

Применение структурно-функциональных моделей ЦА, представленных в виде графов переходов, отображающихся на оси модельного времени позволяет сократить трудоемкость разработки алгоритмов формирования управляющих сигналов [7, 18].

Для реализации режимов пуска и программируемой остановки без разлива продуктов и возникновения бракованной продукции предлагается использовать иерархические ЦА, которые можно проектировать в системах автоматизированного проектирования, например, Active-HDL [26, 27].

## Методы и средства моделирования цифровых автоматов

Для проектирования моделей ЦА целесообразно использовать интегрированную среду проектирования цифровых устройств Active-HDL [20].

Основными функциями среды Active-HDL являются:

1) синтез алгоритмов управления ИМ, представленных в виде графов состояний ЦА с конечным числом состояний;
2) анализ ошибок, вносимых пользователем;
3) объединение отдельных моделей ЦА в сценарии управления ТО путем применения иерархического представления проекта;
4) разработка стимулирующих воздействий (TestBench), которые определяют параметры управляющих сигналов и имитируют срабатывания датчиков, фиксирующих достижения ИМ конечных положений;
5) автоматическая компиляция алгоритмов в программы автоматизированного управления технологическим оборудованием на язык программирования VHDL и обработка файлов с проектами;
6) верификация скомпилированных программ управления ИМ, данный режим необходим для контроля соответствия связей “причина-следствие” между ИМ и данными, указанными в циклограмме ФУМ;
7) имитация отказов ИМ или датчиков, которые контролируют их положение, обеспечивающая прогнозирование последствий неисправностей технологического оборудования и исключение аварийных ситуаций еще на этапе отладки алгоритмов, что снижает трудоемкость поиска и устранения неисправностей при эксплуатации ФУМ [19, 28].

Панель экрана конечного автомата, приведенная на рис. 12, разделена на две части: основание объявлений и рабочую область, в котором проектируется модель ЦА. Заголовок декларации включает в себя декларацию входных и выходных портов автомата.

Приведенные выше функции среды Active-HDL снижают трудоемкость проектирования и верификации моделей ЦА для устройств автоматизированного управления ТО ФУМ.

Применение редактора диаграмм состояний (State Diagram Editor) позволяет автоматизировать формирование HDL-кода проекта, провести его верификацию и выбрать перспективную систему управления.

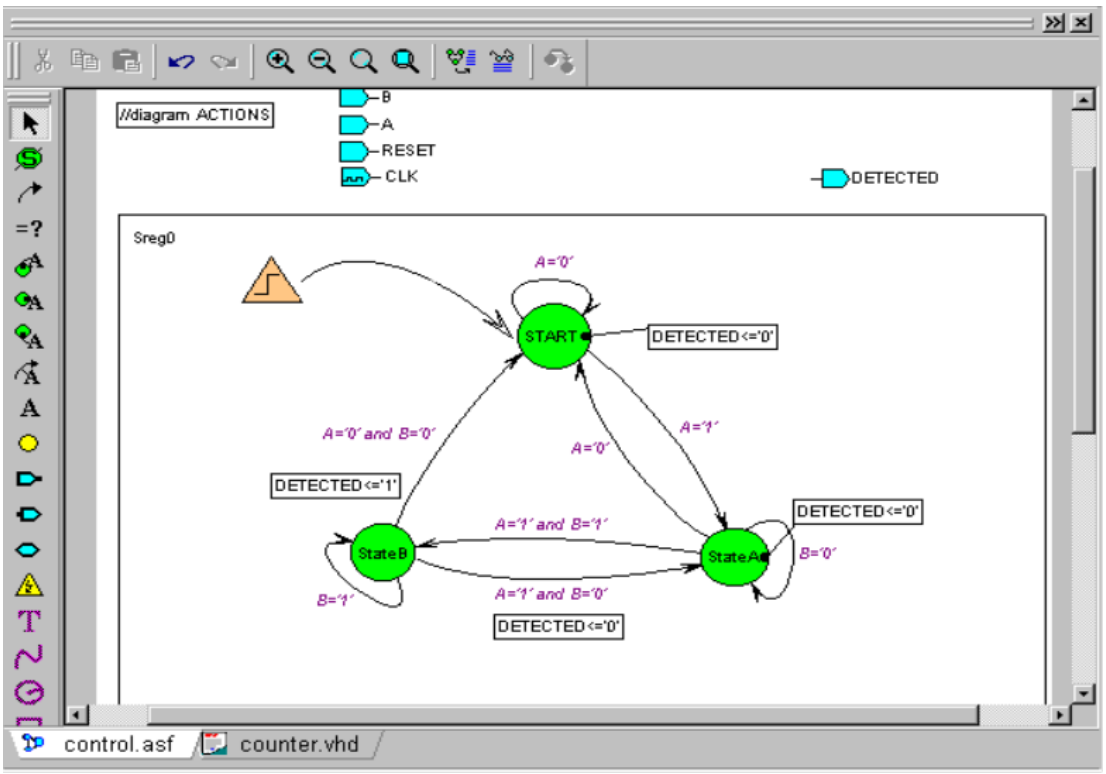



Рис. 12. Пример модели цифрового автомата в среде Active-HDL

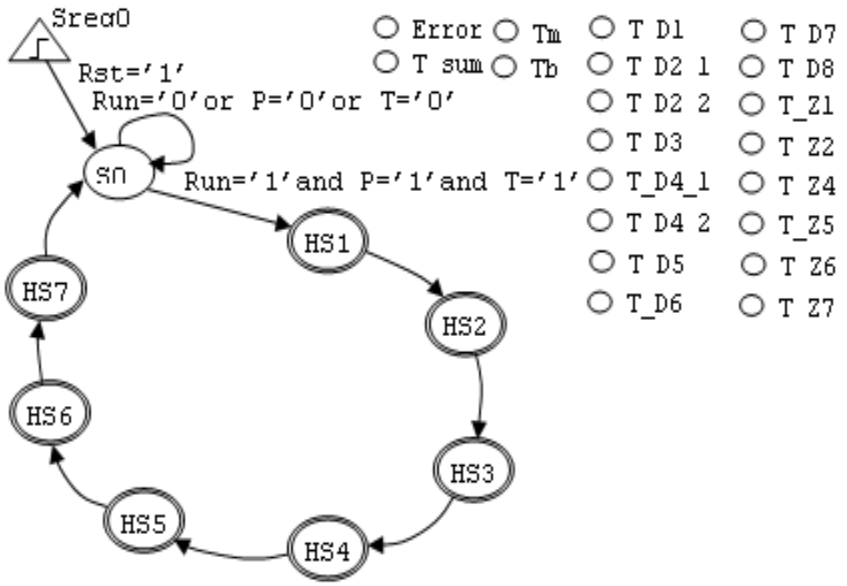
При пуске и программируемой остановке ФУМ необходимо применять сложные алгоритмы, которые можно представить в виде иерархических графов автоматов. Иерархические ЦА для режима пуска приведены на рис. 13, а.

Для объединения различных алгоритмов в общий алгоритм используется иерархический состояние (Hier State, HS). Иерархические группы алгоритмов ЦА для режима пуска и для режима программируемой остановки приведены на рис. 13, б.

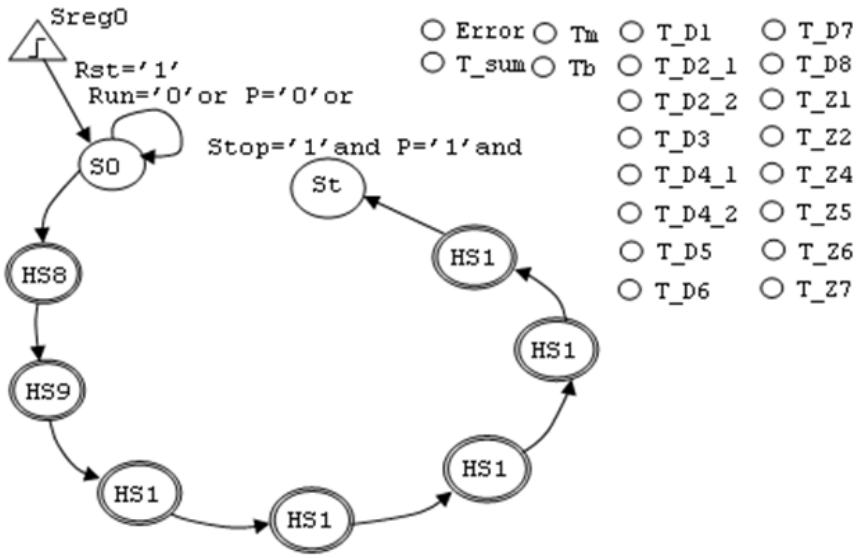
Для перевода автомата в исходное состояние используется одиночный импульс сигнала Rst. В состоянии $S_0$ анализируется выполнение условий запуска автомата. В иерархическом состоянии HS1 формируются управляющие сигналы, активизирующие механизмы, обеспечивающие поворот стола и отделение стаканчиков из подготовленного набора [24].

Для запуска первого цикла ТО необходимо выполнения условия: $Run \wedge P \wedge T = '1'$. Для увеличения модельного времени на величину периода синхросигнала выполняется команда $T_m := now$.

Совмещенная таблица функционирования конечного автомата, полученная на основании анализа модели автомата, управляющего первым циклом операций, приведена в таблице 2.




а)




б)

Рис. 13. Иерархические группы алгоритмов цифровых автоматов:
а) для режима пуска; б) для режима программируемой остановки

Время активного состояния ИМ, выполняющих ТО, задается при помощи временных интервалов T_Z1, T_Z2, которые определяются технологом на циклограмме. Общая продолжительность цикла операций устанавливается параметром T_sum.

В каждом следующем цикле возрастающего фронта операций формируются необходимые управляющие сигналы, обеспечивающие активизацию ИМ, которые находятся на следующих позициях машины и их положения контролируются датчиками перемещения. Для верификации моделей ЦА необходимо контролировать моменты времени включения и выключения всех ИМ [26, 27].

Таблица 2 – Совмещенная таблица функционирования конечного автомата

| Текущее состояние | Условие перехода | Новое состояние | Действие | Функции |
|---|---|---|---|---|
| S0 | Run = '0' or P = '0' or T = '0' | S0 | | |
| S0 | Run ∧ P ∧ T = '1' | S1 | Z1 <= '1' | Tm := now;<br>Tb := now |
| S1 | (Tm - Tb) >= T_D1 and D1 = '0' | S0 | Error := 'A' | |
| S1 | (Tm - Tb) < T_D1 | S1 | | Tm := now |
| S1 | (Tm - Tb) >= T_D1 and D1 = '1' | S2 | Z2 <= '1' | |
| S2 | (Tm - Tb) < T_D1 + T_Z1 | S2 | | Tm := now |
| S2 | (Tm - Tb) >= T_D1 + T_Z1 | S3 | Z1 <= '0' | |
| S3 | (Tm - Tb) >= T_D2_1 and (D2_1 = '0') | S0 | Error := 'B' | |
| S3 | (Tm - Tb) < T_D2_1 | S3 | | Tm := now |
| S3 | (Tm >= T_D2_1) and (D2_1 = '1') | S4 | | |
| S4 | (Tm - Tb) < T_D2_1 + T_Z2 | S4 | | Tm := now |
| S4 | (Tm - Tb) >= T_D2_1 + T_Z2 | S5 | Z2 <= '0' | |
| S5 | (Tm - Tb) >= T_D2_2 and (D2_2 = '0') | S0 | Error := 'C' | |
| S5 | (Tm - Tb) < T_D2_2 | S5 | | Tm := now |
| S5 | (Tm >= T_D2_2) and (D2_2 = '1') | S6 | | |
| S6 | (Tm - Tb) < T_sum | S6 | | Tm := now |
| S6 | (Tm - Tb) >= T_sum | S7 | | Exit |

На рис. 14 показаны результаты моделирования семи циклов возрастающего фронта ТО.

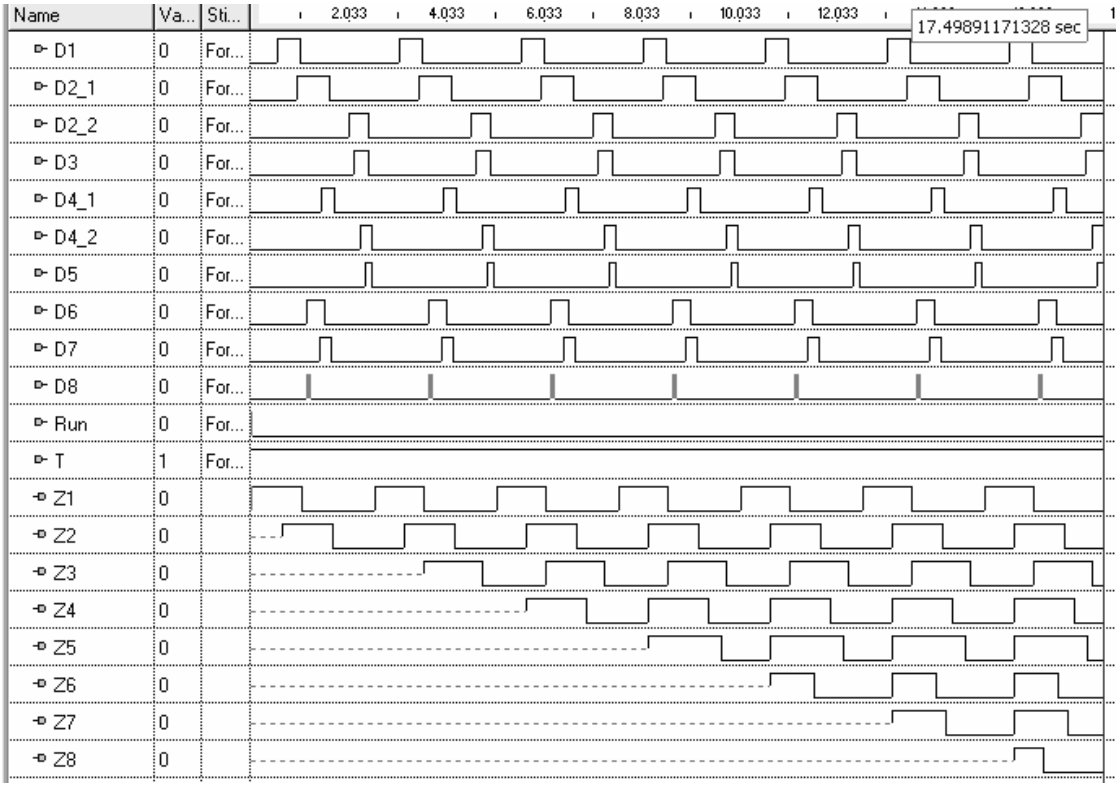



Рис. 14. Результаты моделирования

При анализе возрастающего фронта ТО установлено, что при отказе механизма поворота карусели Z1 или механизмов Z7, или Z8 необходимо остановить машину, т.к. не будет перемещения тары от одной позиции к другой. Для адаптации ТП к отказам остальных механизмов можно использовать результаты моделирования, методика выполнения которого предложена в следующем разделе.

## Адаптация технологических процессов к отказам исполнительных механизмов

В известных алгоритмах управления, если возникнут неисправности в цепочке последовательно расположенных механизмов, выполняющих ТО по фасовке и укупориванию скоропортящихся продуктов, то останавливаются все механизмы для устранения поломки. Этот процесс может занять продолжительное время, в течение которого на рабочем столе остается упаковочная тара, с которой не завершены все ТО, и она может быть по ошибке отправлена потребителю или будет храниться в ненадлежащих климатических условиях.

Для моделирования процессов фасовки и упаковки плодо-молочной продукции целесообразно применять сети Петри, которые являются двудольными, ориентированными мультиграфами, которые описывается пятеркой компонентов [15, 16]:

$$N = (P, T, F, H, \mu_0),$$

где $P$ – конечное непустое множество элементов, называемых позициями;

$T$ – конечное непустое множество элементов, называемых переходами;

$F : P \times T \to \{0, 1, 2, \ldots\}$ и $H : T \times P \to \{0, 1, 2, \ldots\}$ – функции инцидентности;

$\mu_0 : P \to \{0, 1, 2, \ldots\}$ – начальная разметка.

Сети Петри обычно представляют в виде геометрического объекта. При этом позиции изображаются кружками, переходы – черточками или прямоугольниками. Дуга проводится от позиции $p_i$ к переходу $t_j$ в том случае, если $F(p_i, t_j) => 1$, а от перехода $t_j$ к позиции $p_i$, если $H(t_j, p_i) >= 1$.

Если $F(p_i, t_j) => 1$, то позицию $p_i$ называют входной к переходу $t_j$, а переход $t_j$ выходным к позиции $p_i$. В сети Петри условия моделируются позициями, события – переходами. Предусловия событий представляются входными позициями соответствующего перехода, постусловия – выходными позициями.

Множество входных позиций к переходу $t_j$ определяется выражением $pre(t_j) = \{p{:}F(p, t_j) >= 1\}$, а множество выходных переходов к позиции $p_i$ выражением $post(p_i) = \{t{:}F(p_i, t) >= 1\}$. Аналогично определяются множества входных переходов и выходных позиций.

При функционировании сеть Петри переходит от одной разметки к другой. Переход $t$ может сработать при разметке $\mu$,

если $\forall p \in pre(t): \mu(p) - F(p,t) >= 0$, где $\mu(p)$ число меток в позиции $p$. В результате срабатывания перехода $t$ новая разметка $\mu'$ возникает в соответствии со следующим правилом:

$$\forall p \in (pre(t) U post(t)): \mu'(p) = \mu(p) - F(p,t) + H(t,p).$$

В этом случае говорят, что разметка $\mu'$ достижима из разметки $\mu$, а $\mu$ предшествует $\mu'$. Данный факт обозначается следующим образом: $\mu \to t\ \mu'$. Сеть останавливается, если при некоторой разметке не может сработать ни один из ее переходов. Такая разметка называется тупиковой. Таким образом, сеть Петри моделирует некоторую структуру и динамику ее функционирования.

На рис. 15 приведена сеть Петри в виде математической модели для ФУМ, содержащей 4 параллельно работающих механизма [28].

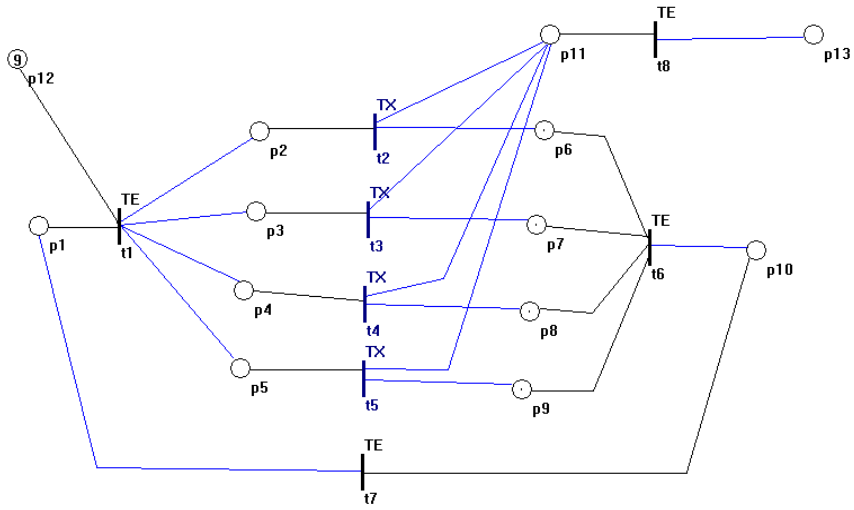



Рис. 15. Состояния сети Петри при исправных механизмах

В сети используются простые переходы – TE и переходы-переключатели – TX. Переход в позицию $p_{11}$ возможен с вероятностью возникновения отказа соответствующего механизма $q_i$. Переход $t_6$ возможен, если все механизмы исправны с вероятностью работоспособного состояния каждого механизма $r_i$ и если все ТО выполнились успешно.

Если в ФУМ произойдет отказ одного из механизмов, (например, 1-го), то в позиции $p_{11}$ появится фишка и все механизмы остановятся для выполнения ремонтных работ. При продолжительном ремонте продукция может испортиться и будет списана как технологические потери.

Введем основные определения, характеризующие возможность адаптации к отказам ИМ [19, 28].

**Определение 4.** ТП называется *алгоритмически неадаптируемым к отказам* исполнительных механизмов, если после выявления какой-либо неисправности исполнительного механизма нельзя применить алгоритм, обеспечивающий работоспособность системы, а необходимо выключить все исполнительные механизмы.

**Определение 5.** ТП называется *алгоритмически адаптируемым к отказам* исполнительных механизмов, если при выявлении отказа $j$-го механизма, где $1 < j \le k-1, k$ – количество исполнительных механизмов, можно выполнить алгоритм адаптации, обеспечивающий отключение механизмов принадлежащих множеству $S_1 \in \{1, 2, \ldots, j+1\}$, и работу оставшихся механизмов по алгоритму адаптации к данному виду отказа.

**Определение 6.** *Алгоритмом адаптации* называется последовательность управляющих сигналов, которая с целью минимизации потерь тары и фасуемой продукции, обеспечивает выполнение ТО исполнительными механизмами, принадлежащих множеству $S_2 \in \{j+2, \ldots, k\}$, и останов механизмов, принадлежащих множеству $S_1 \in \{1, 2, \ldots, j+1\}$.

При отказе механизма, обеспечивающего вращение карусели, предпоследнего или последнего механизмов ФУМ карусельного типа алгоритмическая адаптация ТП к отказам невозможна.

В алгоритмах адаптации к отказам ИМ, управляющие воздействия должны отличаться от воздействий рабочего режима и должны обеспечить дальнейшую работу тех механизмов, на которые не влияют последствия поломки других механизмов в течение нескольких циклов. Для учета возможных отказов механизмов необходимо разработать команды управления механизмами таким образом, чтобы они смогли выполнить еще несколько операций для логичного завершения ТП [28, 29]. Причем каждый механизм должен выполнить разное число операций, число которых возрастает при удалении места расположения механизма от позиции отказавшего механизма.

Сеть Петри ФУМ, алгоритм управления которой обеспечивает контроль работоспособности 1-го механизма, показана на рис. 16. При его отказе принимается решение по адаптированному управлению остальными механизмами.

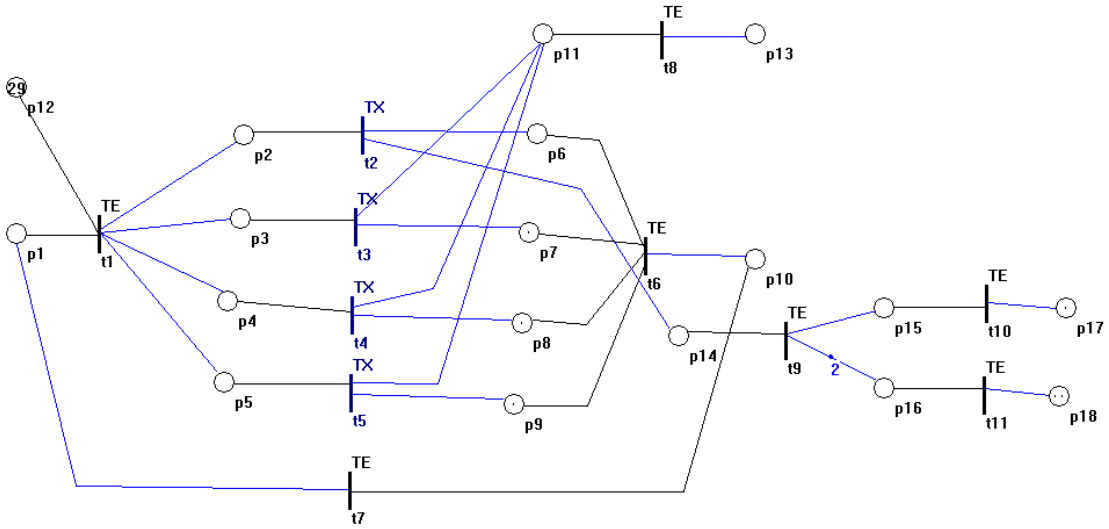



Рис. 16. Состояние сети Петри после отказа 1-го механизма

Если первый механизм подавал стаканчики и вышел из строя, то второму механизму некуда будет наполнять плодо-молочный продукт, и он должен остановиться, а остальные механизмы продолжают работать до тех пор, пока к ним будет поступать пригодные к выполнению операций стаканчики. Аналогичным образом можно смоделировать алгоритмы управления, адаптируемые к отказам остальных механизмов.

Выполним расчет сокращения технологических потерь упаковочной тары и фасуемых продуктов за счет применения предлагаемого алгоритма адаптации ТП к отказам ИМ ФУМ, имеющей 8 механизмов, из которых первый вращает карусель, а восьмой выгружает готовую продукцию. Без данного алгоритма отказ любого механизма приводил к останову машины. Тогда с первой позиции можно вернуть в стопку тары пустой стаканчик или пустую коробку, а из последней позиции можно снять пригодную для продажи продукцию. Таким образом, потери тары и фасуемого продукта для данной ФУМ составят: $P_m = P_{пр} = 5$.

При применении алгоритма управления, адаптированного к отказам ИМ, потери тары и продуктов соответствуют данным, приведенным в таблице 3.

Таблица 3 – Технологические потери из-за отказов исполнительных механизмов

| Номер отказавшего механизма | Величина технологических потерь | |
|---|---|---|
| | тары | продуктов |
| 1 | 5 | 5 |
| 2 | 1 | 0 |
| 3 | 2 | 1 |
| 4 | 3 | 2 |
| 5 | 4 | 3 |
| 6 | 5 | 4 |
| 7 | 6 | 5 |
| 8 | 6 | 5 |

Если учесть, что вероятности возникновения отказов механизмов одинаковы, то можно рассчитать среднюю величину технологических потерь для новой ситуации. Среднее количество потерь тары вычисляется по формуле:

$$P_{ср_m} = \frac{5+1+2+2+4+5+6+6}{8} = \frac{32}{8} = 4.$$

Среднее количество потерь фасуемых продуктов определяется следующим образом:

$$P_{ср_пр} = \frac{5+1+2+3+4+5+5}{8} = \frac{25}{8} = 3{,}125.$$

Экономия потерь фасуемой тары составляет:

$$Э_m = \left(1 - \frac{P_{ср_m}}{P_m}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{4}{5}\right) \cdot 100\% = 20\%.$$

Экономия потерь фасуемых продуктов определяется следующим образом:

$$Э_{пр} = \left(1 - \frac{P_{ср_пр}}{P_{пр}}\right) \cdot 100\% = \left(1 - \frac{3{,}125}{5}\right) \cdot 100\% = 37{,}5\%.$$

Разработанный сценарий управления ИМ, адаптирован к отказам ИМ и позволяет на 20% уменьшить технологические потери упаковочной тары и на 37,5% фасуемых продуктов, а также улучшить качество выпускаемой продукции за счет сокращения времени нахождения ее на столе машины при ремонте.

## Выводы

Отличительными чертами предлагаемой концепции от существующих технологий являются:

- установление взаимосвязи между программистом и инженером-технологом с помощью интерактивной среды разработки;
- сокращение времени разработки ЦС автоматизированного управления ТП;
- уменьшение количества технологических ошибок, как со стороны программиста, так и со стороны инженера-технолога, при создании алгоритма управления ТП.

Таким образом, при применении предложенной концепции инженер-технолог может быть уверен в соблюдении всех важных деталей ТП, а программист имеет возможность избежать большого количества ошибок при создании алгоритма работы, проектируемого устройства. Интерактивная среда также позволит программисту сохранить разработанный алгоритм в существующем формате диаграмм состояний, который можно использовать в уже существующих специализированных средствах проектирования ЦС известных фирм, при этом программист использует новые возможности, которые они предоставляют.

Предлагаемый метод адаптации ТО к отказам ИМ обеспечивает процесс создания сложных систем реального времени, позволяет оценить эффективность алгоритмов и выбрать наиболее эффективный алгоритм еще на этапе проектирования без реализации всей системы. При применении данного метода предоставляется возможность выявить слабые и сильные места процесса управления ИМ, повысить производительность ФУМ за счет выбора наиболее оптимальных алгоритмов управления для достижения конкретной цели с заданными характеристиками.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке РФФИ инициативного научного проекта № 16-08-00393.

## Литература

1. Глушков В. М., Капитонова Ю. В., Мищенко А. Т. Логическое проектирование дискретных устройств. К.: Наук. думка, 1987. 204 с.

2. Глушков В. М. Синтез цифровых автоматов. М.: Физматгиз, 1962. 476 с.

3. Красовский А. А., Поспелов Г. С. Основы автоматики и технической кибернетики. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1962. 600 с.

4. Калянов Г. Н. CASE структурный системный анализ (автоматизация и применение). М.: Лори, 1996. 248 с.

5. Зюбин В. Е. Программирование информационно-управляющих систем на основе конечных автоматов: учеб.-метод. пособ. Новосибирск: Новосибирский государственный университет, 2006. 96 с.

6. Карпов Ю. Г. Теория автоматов. СПб.: Питер, 2002. 224 с.

7. Фурман И. А., Бовчалюк С. Я. Совершенствование математической модели и архитектуры логических управляющих автоматов параллельного действия // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2006. № 3 (59). С. 72-76.

8. Хопкрофт Д., Мотвани Р., Ульман Д. Введение в теорию автоматов, языков и вичислений: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2002. 528 с.

9. Антик М. И. Синхронные цифровые автоматы: учеб. пособ. М.: МИРЭА, 2004. 100 с.

10. Канжелев С. Ю., Шалыто А. А. Автоматическая генерация автоматного кода // Информационно-управляющие системы. 2006. № 6. С. 35-42.

11. Парр Э. Программируемые контроллеры: руководство для инженера: пер. 3-го англ. изд. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. 516 с.

12. Шалыто А. А. Switch-технология. Алгоритмизация и программирование задач логического управления. СПб.: Наука, 1998. 628 с.

13. Шалыто А. А. Автоматное программирование // Компьютерные науки и информационные технологии: тезисы докладов Междунар. науч. конф. памяти проф. А. М. Богомолова. Саратов: Саратовский государственный университет, 2007.

14. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс, 2004. 256 с.

15. Питерсон Дж. Теория сетей Петри и моделирование систем: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 264 с.

16. Шакирова Н. Ф. Формальный аппарат регулярных сетей Петри // Обработка информации и моделирование: сб. ст. Московского физико-технического института. 2002. С. 263-289.

17. Деменков Н. П. Языки программирования промышленных контроллеров: учеб. пособ. / под ред. К. А. Пупкова. М.: Изд-во Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана, 2004. 172 с.

18. Аль Мади М. К., Моамар Д. Н., Уткина Т. Ю. Информационная технология проектирования моделей конечных автоматов // АСУ и приборы автоматики. 2007. № 141 (4). С. 58-62.

19. Лукашенко А. Г., Моамар Д. Н., Рябцев В. Г., Уткина Т. Ю. Метод моделирования алгоритмов управления исполнительными механизмами, адаптируемых к отказам // Перспективные вопросы мировой науки – 2008: материалы IV науч.-практ. конф. (17-19 дек. 2008 г.): тезисы докл. Днепропетровск: Изд. «Наука и образование», 2008. № 19. С. 37-40.

20. Семенец В.В., Хаханова И. В., Хаханов В. И. Проектирование цифровых систем с использованием языка VHDL. Харків: Харківський національний університет радіоелектроніки, 2003. 492 с.

21. Шувалова Л. А. Методы абстрактного синтеза структуры и последовательности выполнения операций фасовочно-упаковочных машин // Вісник Хмельницького національного університету. 2005. № 4. С. 55-58.

22. Шувалова Л. А., Моамар Д. Н., Уткина Т. Ю. Структура программного комплекса синтеза и верификации моделей цифровых автоматов // Системи обробки інформації: зб. наук. пр. Харківського університету Повітряних Сил. 2010. № 5 (85). С. 149-151.

23. Пастпак-Р2 для фасовки зерненого творога // Оборудование для фасовки и упаковки жидких и пастообразных продуктов компании «Таурас-Феникс» [Электронный ресурс]. URL: http://www.taurasfenix.com/manufacture/by-type-auto/fasovochnye-avtomaty-v-plastikovuyu-taru/pastpak-r2/ (дата обращения: 07.01.16).

24. Моамар Д. Н., Уткина Т. Ю., Шувалова Л. А. Метод моделирования алгоритмов автоматизированного управления фасовочно-упаковочными машинами // Вісник Хмельницького національного університету. 2008. № 4. С. 140-144.

25. Уткина Т.Ю. Концепция информационной технологии разработки алгоритмов управления технологическими процессами // Інформаційні технології в освіті, науці і техніці: матеріали VII Всеукр. наук.-практ. конф. (4-6 трав. 2010 р.): тези доп. Черкаси: Черкаський державний технлогчний університет, 2010. Т. 1. С. 61.

26. Моамар Д. Н., Уткина Т. Ю., Шувалова Л. А. Верификация моделей конечных автоматов // Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в науці, освіті та економіці: зб. тез конф. (8-10 квіт. 2008 р.). Луганськ, 2008. С. 72-74.

27. Моамар Д. Н., Уткина Т. Ю., Шувалова Л. А. Метод верификации структурно-функциональных моделей конечных автоматов // Вісник Східноукраїнського національного університету. 2008. № 12 (130). С. 88-94.

28. Моамар Д. Н., Рябцев В. Г., Уткина Т. Ю. Моделирование процесса адаптации технологических операций к отказам исполнительных механизмов // Радіоелектронні і комп’ютерні системи. 2009. № 5 (39). С. 39-43.

29. Уткина Т. Ю., Моамар Д. Н. Алгоритм адаптации управляющей системы к отказам исполнительных механизмов // Інформаційні управляючі системи та комп’ютерний моніторинг: матеріали I Всеукр. наук.-техн. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених. (Донецьк, 19–21 трав. 2010 р.). Донецьк: Донецький національний технічний університет, 2010. С. 122-126.

## References

1. Glushkov V. M., Kapitonova Yu. V., Mishchenko A. T. *Logicheskoe proektirovanie diskretnykh ustroistv* [The Logical Design of Discrete Devices]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1987, 204 p. (in Russian).

2. Glushkov V. M. *Sintez tsifrovykh avtomatov* [Synthesis of Digital Automata]. Moscow, State Publishing House of Physical and Mathematical Literature, 1962, 476 p. (in Russian).

3. Krasovskii A. A., Pospelov G. S. *Osnovy avtomatiki i tekhnicheskoi kibernetiki* [Fundamentals of Automation and Technical Cybernetics]. Moscow, Leningrad, State Publishing House of Literature on Energy, 1962, 600 p. (in Russian).

4. Kalianov G. N. *CASE strukturnyi sistemnyi analiz (avtomatizatsiia i primenenie)* [CASE Structural System Analysis (Automation and Application)]. Moscow, Lori Publ., 1996, 248 p. (in Russian).

5. Zyubin V. E. *Programmirovanie informatsionno-upravliaiushchikh sistem na osnove konechnykh avtomatov* [Programming Information and Control Systems Based on Finite Automata]. Novosibirsk, Novosibirsk State University Publ., 2006, 96 p. (in Russian).

6. Karpov Yu. G. *Teoriia avtomatov* [Automata Theory]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2002, 224 p. (in Russian).

7. Furman I. A., Bovchalyuk S. Ya. Sovershenstvovanie matematicheskoi modeli i arkhitektury logicheskikh upravliaiushchikh avtomatov parallel'nogo deistviia [Improvement of Mathematical Model and Architecture of Logical Control Automatic Machines of Parallel Action]. *Information and Control Systems at Railway Transport*, 2006, vol. 3, no. 59, pp. 72-76 (in Russian).

8. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. *Introduction to Automata Theory, Languages, and Computation*. United States of America, 2ed., 2001, 521 p.

9. Antik M. I. *Sinkhronnye tsifrovye avtomaty* [Synchronous Digital Automata]. Moscow, MIREA Publ., 2004. 100 p. (in Russian).

10. Kanzhelev S. Yu., Shalyto A. A. Avtomaticheskaia generatsiia avtomatnogo koda [Automatic Generation of an Automaton Code]. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy*, 2006, no. 6, pp. 35-42 (in Russian).

11. Parr E. A. *Programmable Controllers. An engineer's guide*, Great Britain, 2003, 430 p.

12. Shalyto A. A. *Switch-tekhnologiia. Algoritmizatsiia i programmirovanie zadach logicheskogo upravleniia* [Switch-Technology. Algorithmic and Programming Logic Control Tasks]. Saint-Petersburg, Nauka Publ., 1998, 628 p. (in Russian).

13. Shalyto A. A. Avtomatnoe programmirovanie [Automata Programming]. *Tezisy dokladov Mezhdunar. nauch. konf. pamiati prof. A. M. Bogomolova "Komp'iuternye nauki i informatsionnye tekhnologii"* [Proceedings of International Scientific Conference in Memory of Prof. A. M. Bogomolov "Computer Science and Information Technology"]. Saratov, Saratov State University Publ., 2007.

14. Petrov I. V. *Programmiruemye kontrollery. Standartnye iazyki i priemy prikladnogo proektirovaniia* [Programmable Controllers. Standard Languages and Techniques of Applied Design]. Moscow, SOLON-Press Publ., 2004, 256 p. (in Russian).

15. Peterson J. *Petri Net Theory and the Modelling of Systems*, Prentice Hall, Englewood Clis, New Jersey, 1981.

16. Shakirova N. F. Formal'nyi apparat reguliarnykh setei Petri [Regular Formal Apparatus of Petri Nets]. *Information Processing and Modeling*. Moscow, 2002, pp. 263-289 (in Russian).

17. Demenkov N. P. *Iazyki programmirovaniia promyshlennykh kontrollerov* [Programming Languages of Industrial Controllers]. Moscow, Bauman Moscow State Technical University Publ., 2004, 172 p. (in Russian).

18. Almadi M. K., Moamar D. N., Utkina T. Yu. Informatsionnaia tekhnologiia proektirovaniia modelei konechnykh avtomatov [Information Technology of Designing Models of Finite Automata]. *Automated Control Systems and Automation Devices*, 2007, vol. 4, no. 141, pp. 58-62 (in Russian).

19. Lukashenko A. G., Moamar D. N., Ryabtsev V. G., Utkina T.Yu. Metod modelirovaniia algoritmov upravleniia ispolnitel'nymi mekhanizmami, adaptiruemykh k otkazam [The Modeling Method of Control Algorithms Actuators Adapted to Failures]. *Materialy IV nauch.-prakt. konf. "Perspektivnye voprosy mirovoi nauki - 2008"* [Proceedings of the 4th Scientific-Practical Conf. "Future Issues of the World of Science - 2008"]. Dnepropetrovsk, 2008, pp. 37-40 (in Russian).

20. Semenets V. V., Khakhanova I. V., Khakhanov V. I. *Proektirovanie tsifrovykh sistem s ispol'zovaniem iazyka VHDL* [Design of Digital Systems Using VHDL Language]. Kharkiv, Kharkiv National University of Radio Electronics Publ., 2003, 492 p. (in Russian).

21. Shuvalova L. A. Metody abstraktnogo sinteza struktury i posledovatel'nosti vypolneniia operatsii fasovochno-upakovochnykh mashin [Abstract Methods of Synthesis of Structure and Sequence Performing the Filling and Packaging Machines Operations]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Technical science*, Khmelnitsky, 2005, no. 4, pp. 55-58 (in Russian).

22. Shuvalova L. A., Moamar D. N., Utkina T. Yu. Struktura programmnogo kompleksa sinteza i verifikatsii modelei tsifrovykh avtomatov [Structure of the program complex of synthesis and verification of models of digital automata]. *Systems of Information Processing*, Kharkiv, 2010, vol. 5, no. 85, pp. 149-151 (in Russian).

23. Pastpack-P2 for packing of granulated cottage cheese. *Equipment for filling and packaging of liquid and paste products company "Tauras Fenix".* Available at: http://www.taurasfenix.com/manufacture/by-type-auto/fasovochnye-avtomaty-v-plastikovuyu-taru/pastpak-r2/ (accessed 7 January 2016) (in Russian).

24. Moamar D. N., Utkina T.Yu., Shuvalova L. A. Metod modelirovaniia algoritmov avtomatizirovannogo upravleniia fasovochno-upakovochnymi mashinami [The Method of Modeling Algorithms for Automated Control of Packing Machines].

*Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu, Technical science*, Khmelnitsky, 2008, no. 4, pp. 140-144 (in Russian).

25. Utkina T. Yu. Kontseptsiia informatsionnoi tekhnologii razrabotki algoritmov upravleniia tekhnologicheskimi protsessami [The Concept of Information Technology for Development of Control Algorithms of Technological Processes]. *Materiali VII Vseukr. nauk.-prakt. konf. "Informatsiini tekhnologiї v osviti, nautsi i tekhnitsi"* [Proceedings of the 7th All-Ukrainian scientific-practical conference "Information Technology in Education, Science and Technology"]. Cherkasy, Cherkasy State Technological University Publ., 2010, vol. 1, p. 61 (in Russian).

26. Moamar D. N., Utkina T.Yu., Shuvalova L. A. Verifikatsiia modelei konechnykh avtomatov [Verification of Models Finite Automata]. *Zbirnyk tez konf. "Suchasni tendentsiї rozvitku informatsiinikh tekhnologii v nautsi, osviti ta ekonomitsi"* [Proc. of the Conf. "Modern Trends in Information Technologies in Science, Education and the Economy"]. Lugansk, 2008, pp. 72-74 (in Russian).

27. Moamar D. N., Utkina T. Yu., Shuvalova L. A. Metod verifikatsii strukturno-funktsional'nykh modelei konechnykh avtomatov [The Method Verification of the Structural and Functional Models of Finite Automata]. *Visnik of the Volodymyr Dal East Ukrainian National University*, Lugansk, 2008, vol. 12, no. 130, pp. 88-94 (in Russian).

28. Moamar D. N., Ryabtsev V. G., Utkina T. Yu. Modelirovanie protsessa adaptatsii tekhnologicheskikh operatsii k otkazam ispolnitel'nykh mekhanizmov [Modeling of the Adaptation Process of Technological Operations to the Actuators Failures]. *Radioelectronic and computer systems*, 2009, vol. 5, no. 39, pp. 39-43 (in Russian).

29. Utkina T. Yu., Moamar D. N. Algoritm adaptatsii upravliaiushchei sistemy k otkazam ispolnitel'nykh mekhanizmov [Algorithm of Adaptation of the Control System to Failures of Actuators]. *Materiali I Vseukr. nauk.-tekhn. konf. studentiv, aspirantiv ta molodikh vchenikh "Informatsiini upravliaiuchi sistemi ta komp'iuternii monitoring"* [Proceedings of the 1st All-Ukrainian Scientific-Technical Conf. of Students, Graduate Students and Young Scientists "Information Control Systems and Computer Monitoring"]. Donetsk, Donetsk National Technical University Publ., 2010, pp. 122-126 (in Russian).

**Статья поступила 13 января 2016 г.**

## Информация об авторах

*Рябцев Владимир Григорьевич* – доктор технических наук, профессор. Профессор кафедры электротехнологий и электрооборудования в сельском хозяйстве. Волгоградский государственный аграрный университет. Область научных интересов: системы автоматизированного диагностирования полупроводниковых запоминающих устройств, инструментальные средства синтеза тестов для верификации моделей цифровых систем, содержащих встроенную память. Тел.: +7 844 241 16 04. E–mail: akim.onoke@mail.ru

Адрес: 400002, Россия, г. Волгоград, пр. Университетский, д. 26.

*Уткина Татьяна Юрьевна* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры специализированных компьютерных систем. Черкасский государственный технологический университет (Украина). Область научных интересов: синтез моделей систем управления автоматизированными процессами, разработка алгоритмов управления цифровыми устройствами, методы и средства повышения надежности микросхем полупроводниковой памяти. Тел.: +38 068 393 01 33. E–mail: utia_chdtu@yahoo.com

Адрес: 18006, Украина, г. Черкассы, бул. Шевченко, д. 460.

---

# Information Technology of Design of Automated Systems Control of Technological Processes

V. G. Ryabtsev, T. Yu. Utkina

***Purpose.*** *A common feature of all control processes is that they are informative as any process to achieve the objective requires the collection, processing and transmission of information. The development of computer technology allows faster processing and exchange of information. This reduces the time to perform the transaction with an information resource. The intensity of occurrence of failures increases and there is a loss of information that causes interruptions in the operation of control systems and increases economic costs. Currently remain unresolved problem of increasing the efficiency of the process of constructing models of control systems by improving ways to convert information and increase reliability by adapting technological operations to the failure of the actuators. The purpose of the present paper is to create and develop the information technology of synthesis of models of automated control systems, designed to reduce the complexity of process of construction models by improving methods of transformation information about the system, and the development of methods to increase reliability by adapting technological operations to the failure of the actuators. To reduce the complexity the development of algorithms of digital automata is proposed to apply the structural and functional models that are presented in the form of directed graphs.* ***Methods.*** *The methods based on the use the graph theory, logic algebra, theory of digital automata, system analysis, technologies of design software systems, Petri nets, theory of reliability and methods of technical diagnostics.* ***Novelty.*** *Novel features of the presented solution are the structural and functional models of digital automata of control actuators that reduce the complexity of development projects control means by transforming the information contained in the sequence diagram into an intermediate form suitable for the synthesis of digital automaton with the help of modern tools. The functional model to adapt control process to possible failures of the actuators also should be referred to novel features.* ***Results.*** *Using structural and functional models of digital automata for the synthesis of algorithms of automated control systems allows reducing the duration of the design models of digital automata control of filling and packaging machines. The improved method of modeling algorithms for automated control of filling and packaging machines allows forecasting the effects of technological equipment faults at the stage of debugging algorithms, which also reduces the complexity of troubleshooting.* ***Practical relevance.*** *Applying the proposed solution allows reducing technological losses of the package and packed product, as well as improve the quality of the products by reducing the time spent it without proper storage conditions for the repair filling machine and cut company expenses on recycling of production wastes. The implementation of the new technology allows you to convert the information contained in the sequence diagram in an intermediate form suitable for the synthesis of digital automaton with modern tools to evaluate alternative control algorithms and select the most efficient at the design stage of the system without implementing the entire system.*

*Key words: automated control system, information technology, technological operations, digital automata, structural and functional models, actuators, sequence diagram, filling and packaging machines.*

## Information about Authors

*Vladimir Grigorievich Ryabtsev* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Full Professor. Professor at the Department of Electrotechnologies and electric equipment in agriculture. Volgograd Agricultural State University. Field of research: diagnostics automated systems of the semiconductor memory devices; means of synthesis of tests for verification of models of digital systems containing built-in memory. Tel.: +7 844 241 16 04. E–mail: akim.onoke@mail.ru

Address: Russia, 400002, Volgograd, University pr. 26.

*Tetyana Yuriyivna Utkina* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Associate Professor at the Department of Specialize Computer Systems. Cherkasy State Technological University (Ukraine). Field of research: synthesis of models control systems of automated processes; development of control algorithms for digital devices; methods and means of improving the reliability of semiconductor memory chips. Tel.: +38 068 393 01 33. E–mail: utia_chdtu@yahoo.com

Address: Ukraine, 18006, Cherkasy, Shevchenko blvd. 460.

УДК 62-50; 519.7; 519.8

# Интервальная задача оптимизации себестоимости и эффективности продукции

Левин В. И., Немкова Е. А.

***Актуальность.*** *В статье рассмотрены существующие подходы к актуальной проблеме оптимизации себестоимости и эффективности продукции, выпускаемой производственными системами, функционирующими в условиях неопределенности. Дана точная постановка задачи условной оптимизации себестоимости и эффективности продукции производственной системы при интервальной неопределенности параметров целевой функции и ограничений. Целевая функция системы считается нелинейной.* ***Цель статьи.*** *Целью статьи является изложение идеи решения задачи условной нелинейной оптимизации системы при интервальной неопределенности ее параметров. Эта идея основана на правилах математической теории сравнения интервалов, позволяющих заменить сравнение интервалов и выделением большего (меньшего) интервала сравнением их нижних и верхних границ и выделение большей (меньшей) границы.* ***Используемые методы.*** *На базе изложенной идеи сформулирован и обоснован метод детерминизации решения задачи условной нелинейной оптимизации при интервальной неопределенности параметров оптимизируемой системы путем ее сведения к двум полностью определенным задачам условной оптимизации того же типа.* ***Новизна.*** *Сформулировано и доказано предложение, определяющее решение задачи условной нелинейной оптимизации при интервальной неопределенности параметров оптимизируемой системы через решения двух полностью определенных задач оптимизации того же типа. Также сформулирована и доказана теорема, определяющая необходимое и достаточное условие существования решения задачи условной нелинейной оптимизации при интервальной неопределенности ее параметров.* ***Результат.*** *Построен алгоритм решения задачи условной нелинейной оптимизации при интервальной неопределенности параметров оптимизируемой системы, который основан на методе детерминизации. Приведен пример работы алгоритма. Проведено сравнение предложенного подхода к решению задач условной нелинейной оптимизации с другими подходами. Указаны достоинства и недостатки различных подходов.*

***Ключевые слова:*** *нелинейная оптимизация, неопределенность, оптимизация при интервальной неопределенности, метод детерминизации.*

## Введение

Метод математической детерминизации как эффективный метод решения задач условной оптимизации при наличии интервальной неопределенности, подробно описанный в литературе, в последние два десятилетия уже неоднократно применялся для решения различных конкретных классов задач условной оптимизации при наличии интервальной неопределенности, таких как задача о назначениях, общая и булева задачи линейного математического программирования, задачи теории антагонистических игр и некоторые другие [1, 2, 3, 4, 5, 6, 8].

В настоящей статье рассмотрены и решены методом математической детерминизации некоторые новые классы задач условной оптимизации при наличии интервальной неопределенности, связанные с математическим моделированием и оптимизацией производственных систем. Рассмотрение строится вокруг задачи дробно-линейного математического программирования, в терминах которой можно моделировать формирование удельной

себестоимости и удельной эффективности продукции производственных систем и оптимизировать эти два показателя.

## 1. Постановка задачи

Предположим, что для производства $n$ видов изделий в производственной системе используется $m$ видов оборудования. Известно, что в данной производственной системе время обработки $j$-го изделия на $i$-м оборудовании составляет $a_{ij}$. Пусть также известны ограничения на время использования каждого $i$-го вида оборудования $b_i$, затраты $c_j$ на производство одного изделия каждого $j$-го вида и эффективность $d_j$ использования одного изделия каждого $j$-го вида. Необходимо составить такой план производства изделий $(x_1, x_2, .. x_n)$, чтобы себестоимость получения единицы эффективности выпускаемых изделий была минимальной. Здесь $x_j$ - план производства $j$-го изделия. Эта задача, связанная с производственной системой, приводит к математической задаче дробно-линейного математического программирования детерминированного типа, т.е. с полностью определенными параметрами $c_j, d_j, b_i, a_{ij}$ [6, 11]. А именно, в принятых обозначениях сумма $\sum_{j=1}^{n} c_j x_j$ показывает суммарные затраты на производство планового количества всех изделий, $\sum_{j=1}^{n} d_j x_j$ – суммарную эффективность использования всех изделий, произведенных по плану, а сумма $\sum_{j=1}^{n} d_{ij} x_j$ – суммарное время использования оборудования $i$-го вида, необходимое для производства планового количества всех изделий. Ясно, что тогда дробь $\dfrac{\sum_{j=1}^{n} c_j x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j x_j}$ показывает себестоимость единицы эффективности выпускаемых изделий, другими словами, удельную себестоимость эффективности этих изделий.

Итак, общая детерминированная задача дробно-линейного математического программирования определяет задачу оптимизации удельной себестоимости продукции производственной системы. Эта задача состоит в нахождении минимального значения дробно-линейной целевой функции

$$F = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_j x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j x_j} \tag{1}$$

при линейных ограничениях

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le b_i, \ (i = \overline{1,m}), \ \ x_j \ge 0, \ (j = \overline{1,n}), \tag{2}$$

где $c_j, d_j, b_i, a_{ij}$ - некоторые постоянные положительные числа. В задаче предполагается, что знаменатель целевой функции $\sum_{j=1}^{n} d_j x_j$ всегда неотрицателен и, кроме того, не равен 0 в области неотрицательных решений системы линейных неравенств (2).

Если поменять местами смысл коэффициентов $c_j$ и $d_j$ в (1), т.е. понимать под $c_j$ эффективность использования одного изделия *j*-го вида, а под $d_j$ - затраты на производство одного изделия *j*-го вида, то функция (1) приобретает смысл удельной эффективности выпускаемых изделий, приходящейся на единицу затрат, связанных с производством изделий, которую нужно максимизировать. При этом получаем двойственную к предыдущей общую задачу дробно-линейного программирования: найти максимальное значение дробно-линейной целевой функции (1) при ограничениях (2) с положительными коэффициентами $c_j, d_j, b_i, a_{ij}$ и всегда неотрицательным знаменателем целевой функции, который вдобавок не равен 0 в области неотрицательных решений системы линейных неравенств (2). Методы решения обеих сформулированных версий общей задачи дробно-линейного математического программирования однотипны. Поэтому ниже рассматривается решение только одной версии этой задачи – максимизации дробно-линейной функции (1) при линейных ограничениях (2).

Изложим кратко основные сведения из теории решения детерминированных задач линейного и дробно-линейного математического программирования [7]. Как известно, многогранником в *n*-мерном пространстве называется замкнутое, выпуклое и ограниченное множество точек *n*-мерного пространства с конечным числом угловых точек. В частности, в случае двух переменных (*n*=2) многогранник превращается в плоский многоугольник. Угловой точкой многогранника называется точка, которая не является выпуклой линейной комбинацией каких-либо (различных) точек указанного множества. Как и в случае основной задачи линейного программирования, имеющей, как известно, линейную целевую функцию и систему линейных неравенств-ограничений, свое максимальное значение дробно-линейная целевая функция (1) принимает в одной из вершин многогранника возможных (допустимых) решений, определяемого системой линейных ограничений (2). Если же максимальное значение целевая функция (1) принимает более, чем в одной вершине многогранника допустимых решений (2), то она достигает его также во всякой точке, являющейся выпуклой линейной комбинацией данных вершин. Приведенные сведения в принципе позволяют решать детерминированные задачи дробно-линейного математического программирования невысокой размерности *m* методом перебора.

Рассмотрим теперь недетерминированный (интервальный) вариант задачи дробно-линейного математического программирования, состоящий в определении максимального значения дробно-линейной функции (1) при линейных ограничениях (2), в предположении, что положительные

коэффициенты функций в (1), (2) известны неточно и задаются лишь с точностью до положительных интервалов их возможных значений

$$\tilde{c}_j = [c_{j1}, c_{j2}],\ \tilde{d}_j = [d_{j1}, d_{j2}],$$
$$\tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}],\ \tilde{a}_{ij} = [a_{ij1}, a_{ij2}],\ i = \overline{1,m},\ j = \overline{1,n}. \quad (3)$$

Этот вариант задачи дробно-линейного математического программирования позволяет выполнить моделирование и оптимизацию удельной себестоимости (удельной эффективности) недетерминированной производственной системы с указанными интервальными параметрами. Сформулированный вариант интервальной задачи дробно-линейного математического программирования является частным случаем сформулированной в [4] общей интервальной задачи условной оптимизации.

## 2. Алгоритм математического моделирования и оптимизации себестоимости (эффективности) продукции производственных систем с двумя видами выпускаемых изделий

Метод решения сформулированной в п. 1 интервальной задачи дробно-линейного математического программирования, позволяющий моделировать и оптимизировать формирование удельной себестоимости (удельной эффективности) продукции производственной системы, базируется на методе математической детерминизации, являющемся общим методом решения произвольных интервальных задач условной оптимизации [4]. Этот метод будет продемонстрирован ниже на примере задачи с $n = 2$ переменными, позволяющей моделировать и оптимизировать формирование удельной себестоимости (удельной эффективности) производственной системы с $n = 2$ изделиями. Такая задача звучит следующим образом: найти максимальное значение интервальной дробно-линейной целевой функции

$$\tilde{F} = \frac{\tilde{c}_1 x_1 + \tilde{c}_2 x_2}{\tilde{d}_1 x_1 + \tilde{d}_2 x_2} \quad (4)$$

при линейных интервальных ограничениях

$$\tilde{\phi}_i \equiv \tilde{a}_{i1} x_1 + \tilde{a}_{i2} x_2 \le \tilde{b}_i,\ (i = \overline{1,m}),\ x_1, x_2 \ge 0, \quad (5)$$

в предположении, что коэффициенты целевой функции и ограничений $\tilde{c}_j$, $\tilde{d}_j$, $\tilde{b}_i$, $\tilde{a}_{ij}$ - интервалы вида $\tilde{c}_j = [c_{j1}, c_{j2}]$, $\tilde{d}_j = [d_{j1}, d_{j2}]$, $\tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}]$, $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij1}, a_{ij2}]$, в которых $c_{j1}, d_{j1}, a_{ij1}, b_{i1}$ - минимальные значения интервальных коэффициентов (нижние границы интервалов), а $c_{j2}, d_{j2}, a_{ij2}, b_{i2}$ - максимальные значения интервальных коэффициентов (верхние границы интервалов). Будем считать, что знаменатель целевой функции (4) всегда неотрицателен и, кроме того, не равен 0 в области неотрицательных решений системы линейных неравенств (5).

Начнем с решения базовой детерминированной задачи дробно-линейного математического программирования, которая в нашем случае звучит так: найти максимальное значение детерминированной дробно-линейной целевой функции

$$F = \frac{c_1 x_1 + c_2 x_2}{d_1 x_1 + d_2 x_2}, \tag{6}$$

при детерминированных линейных ограничениях

$$\phi_i = a_{i1} x_1 + a_{i2} x_2 \le b_i, \; i = \overline{1,m}, \; x_1, x_2 \ge 0, \tag{7}$$

в предположении, что знаменатель целевой функции (6) всегда неотрицателен и, кроме того, не равен 0 в области неотрицательных решений системы линейных неравенств (7).

Чтобы найти решение поставленной детерминированной задачи оптимизации (6), (7), сначала находим известными методами решение ее системы линейных ограничений (7), что дает многоугольник допустимых решений задачи. Далее полагаем значение целевой функции (6) равным некоторому фиксированному числу $h_0$. Получаем соответствующую фиксированную прямую, проходящую через начало координат. Вращая построенную прямую вокруг начала координат, получаем множество всех прямых, проходящих через начало координат и имеющих различные возможные значения параметра $h_0$. Из этих прямых определяем экстремальную – ту, которая находится в пределах многоугольника допустимых решений и имеет максимальное значение параметра $h_0$ среди всех прямых, находящихся в указанных пределах.

Согласно теории [7], экстремальная прямая, если она существует, имеет общую точку с многоугольником допустимых решений в одной из его угловых вершин. Таким образом, вращая построенную прямую вокруг начала координат, мы либо находим вершину (вершины) многоугольника допустимых решений, в которой целевая функция принимает максимальное значение (т.е. находим решение задачи условной оптимизации (6), (7)), либо устанавливаем отсутствие решения (в случае, если вращаемая прямая не имеет общих точек с многоугольником допустимых решений в его угловых точках).

Итак, алгоритм нахождения решения детерминированной задачи дробно-линейного математического программирования включает следующие шаги:

1. В системе ограничений задачи (7) знаки неравенств заменяются на знаки точных равенств и строятся определяемые этими равенствами прямые.
2. Находятся полуплоскости, определяемые каждым из неравенств системы ограничений задачи.
3. Находится многоугольник допустимых решений задачи в виде пересечения полуплоскостей, найденных на шаге 2.
4. Строится прямая, уравнение которой получается, если положить значение целевой функции (6) равным некоторому постоянному числу $h_0$.
5. Вращая построенную прямую вокруг начала координат (т. е. меняя значение $h_0$), определяем точку максимума целевой функции, т. е. точку, в которой $h_0 = \max$, или, если ее нет, устанавливаем неразрешимость задачи.

Теперь перейдем к решению собственно интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (4), (5). Будем решать поставленную интервальную задачу методом математической детерминизации, т.е. сведением к двум аналогичным детерминированным задачам [12].

Используем алгоритм решения, приведенный в [10]. Применительно к рассматриваемой задаче он конкретизируется следующим образом [9, 12].

*Шаг* 1. Используя формулы интервальной математики, выражающие результаты элементарных преобразований интервалов, представляем целевую функцию $\tilde{F}$, функции ограничений $\tilde{\phi}_i$ и параметры $\tilde{b}_i$ решаемой задачи (4), (5) в виде интервалов

$$\begin{aligned} &\tilde{F} = [F_1, F_2]; \\ &\tilde{\phi}_i = [\phi_{i1}, \phi_{i2}], i = \overline{1,m}; \\ &\tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}], i = \overline{1,m}. \end{aligned} \tag{8}$$

Так как целевая функция $\tilde{F}$ является нелинейной и представляет собой отношение двух линейных функций с положительными коэффициентами и неотрицательными переменными (4) , то нижняя граничная функция $F_1$ целевой функции $\tilde{F}$ будет получена при замене всех интервальных коэффициентов числителя целевой функции их нижними границами, а всех интервальных коэффициентов знаменателя целевой функции их верхними границами. Верхняя граничная функция $F_2$ целевой функции $\tilde{F}$ будет получена при замене всех интервальных коэффициентов числителя целевой функции их верхними границами, а всех интервальных коэффициентов знаменателя целевой функции их нижними границами.

Таким образом, получаем выражения указанных граничных функций $F_1$ и $F_2$ в виде

$$\begin{aligned} &F_1 = \frac{c_{11}x_1 + c_{21}x_2}{d_{12}x_1 + d_{22}x_2}, \\ &F_2 = \frac{c_{12}x_1 + c_{22}x_2}{d_{11}x_1 + d_{21}x_2}. \end{aligned} \tag{9}$$

Далее, так как произвольная $i$-я функция ограничений $\tilde{\phi}_i$ является линейной функцией с положительными коэффициентами и неотрицательными переменными (5), то ее нижняя граничная функция $\phi_{i1}$ и верхняя граничная функция $\phi_{i2}$ получаются в виде следующих выражений:

$$\phi_{i1} = a_{i11}x_1 + a_{i21}x_2 \ , \ \phi_{i2} = a_{i12}x_1 + a_{i22}x_2 \, , \ i = \overline{1,m} \, . \tag{10}$$

Итак, интервальная форма максимизируемой дробно-линейной целевой функции $\tilde{F}$ решаемой интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (4), (5) имеет вид интервала (8), нижняя и верхняя границы которого выражаются формулами (9), т.е.

$$\tilde{F} = \left[ F_1 = \frac{c_{11}x_1 + c_{21}x_2}{d_{12}x_1 + d_{22}x_2}, F_2 = \frac{c_{12}x_1 + c_{22}x_2}{d_{11}x_1 + d_{21}x_2} \right]. \tag{11}$$

Аналогично, интервальная форма произвольной $i$-й функции ограничений $\tilde{\phi}_i$ решаемой задачи имеет вид интервала (8), нижняя и верхняя границы которого выражаются формулами (10), т.е. имеют вид

$$\tilde{\varphi}_i = [\varphi_{i1} = a_{i11}x_1 + a_{i21}x_2, \varphi_{i2} = a_{i12}x_1 + a_{i22}x_2],\ i = \overline{1,m}. \quad (12)$$

*Шаг* 2. Используя полученные на шаге 1 интервальные представления (8) целевой функции $\tilde{F}$, функций ограничений $\tilde{\phi}_i$ и параметров ограничений $\tilde{b}_i$, формируем нижнюю и верхнюю граничные задачи решаемой интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (4), (5):

$$\left.\begin{aligned} &F_1(x_1,x_2) \equiv \frac{c_{11}x_1 + c_{21}x_2}{d_{12}x_1 + d_{22}x_2} = \max, \\ &\phi_{i1}(x_1,x_2) = a_{i11}x_1 + a_{i21}x_2 \le b_{i1}, i = \overline{1,m}, \\ &\phi_{i2}(x_1,x_2) = a_{i12}x_1 + a_{i22}x_2 \le b_{i2}, i = \overline{1,m}, \\ &x_1 \ge 0, x_2 \ge 0. \end{aligned}\right\} \text{– нижняя граничная задача,} \quad (13)$$

$$\left.\begin{aligned} &F_2(x_1,x_2) \equiv \frac{c_{12}x_1 + c_{22}x_2}{d_{11}x_1 + d_{21}x_2} = \max, \\ &\phi_{i1}(x_1,x_2) = a_{i11}x_1 + a_{i21}x_2 \le b_{i1}, i = \overline{1,m}, \\ &\phi_{i2}(x_1,x_2) = a_{i12}x_1 + a_{i22}x_2 \le b_{i2}, i = \overline{1,m}, \\ &x_1 \ge 0, x_2 \ge 0. \end{aligned}\right\} \text{– верхняя граничная задача.} \quad (14)$$

*Шаг* 3. Используя известный метод решения детерминированных задач условной оптимизации, находим решения нижней $\{M_н(x), F_{1,\max}\}$ и верхней $\{M_в(x), F_{2,\max}\}$ граничных задач. Здесь $M_н(x)$ - множество точек решения $x = (x_1, x_2)$ нижней граничной задачи (в них целевая функция этой задачи $F_1$ достигает максимума $F_{1,\max}$), а $M_в(x)$ - множество точек решения $x = (x_1, x_2)$ верхней граничной задачи (в них целевая функция этой задачи $F_2$ достигает максимума $F_{2,\max}$).

*Шаг* 4. Выбирая в качестве точки решения интервальной задачи (4), (5) любую точку $x^* = (x_1^*, x_2^*)$ из пересечения множеств $M_н(x)$ и $M_в(x)$ точек решения нижней и верхней граничных задач и беря в качестве нижней границы интервала-максимума $\tilde{F}_{\max}$ интервальной целевой функции $\tilde{F}$ этой задачи максимум $F_{1,\max}$ целевой функции нижней граничной задачи, а в качестве верхней границы того же интервала - максимума $\tilde{F}_{\max}$ - максимум $F_{2,\max}$ целевой функции верхней граничной задачи, получаем полное решение интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (4), (5) в виде

$$\{x^* \in M_н(x) \cap M_в(x), \tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]\}. \quad (15)$$

## 3. Пример решения задачи моделирования и оптимизации себестоимости (эффективности) продукции производственной системы с двумя видами выпускаемых изделий

Найдем максимальное значение интервальной дробно-линейной функции

$$\tilde{F} = \frac{\tilde{c}_1 x_1 + \tilde{c}_2 x_2}{\tilde{d}_1 x_1 + \tilde{d}_2 x_2} \tag{16}$$

при интервальных линейных ограничениях

$$\begin{aligned} \tilde{\phi}_1 &= \tilde{a}_{11} x_1 + \tilde{a}_{12} x_2 \le \tilde{b}_1 \\ \tilde{\phi}_2 &= \tilde{a}_{21} x_1 + \tilde{a}_{22} x_2 \le \tilde{b}_2 \\ \tilde{\phi}_3 &= \tilde{a}_{31} x_1 + \tilde{a}_{32} x_2 \le \tilde{b}_3 \end{aligned} \tag{17}$$

Интервальные коэффициенты в целевой функции (16) и ограничениях (17) таковы: $\tilde{c}_1 = [2,4]$, $\tilde{c}_2 = [3,5]$, $\tilde{d}_1 = [1,3]$, $\tilde{d}_2 = [1,4]$, $\tilde{a}_{11} = [2,3]$, $\tilde{a}_{12} = [8,12]$, $\tilde{b}_1 = [26,48]$, $\tilde{a}_{21} = [1,2]$, $\tilde{a}_{22} = [1,2]$, $\tilde{b}_2 = [4,6]$, $\tilde{a}_{31} = [12,16]$, $\tilde{a}_{32} = [3,4]$, $\tilde{b}_3 = [39,56]$, переменные $x_1$ и $x_2$ могут принимать только неотрицательные значения.

Таким образом, математическая постановка задачи состоит в определении неотрицательного решения системы трех интервальных линейных неравенств (17), при котором достигается максимум интервальной дробно-линейной функции двух переменных $\tilde{F}$ (16). Содержательный смысл данной задачи заключается в максимизации удельной (приходящейся на единицу затрат) эффективности продукции некоторой производственной системы с двумя видами выпускаемых изделий путем оптимизации ее плана выпуска $x = (x_1, x_2)$. При этом удельная эффективность продукции системы описывается выражением (16) в виде интервальной дробно-линейной функции $\tilde{F}$, а ограничения на время использования каждого $i$-го вида производственного оборудования системы – $i$-м неравенством (17) (подробнее см. п. 1).

Для решения задачи будет применен описанный выше алгоритм [11].

*Шаг* 1. Представляем целевую функцию $\tilde{F}$ и функции ограничений $\tilde{\phi}_i$, $i = \overline{1,3}$, решаемой задачи в интервальной форме. По формулам (8)–(12) получаем:

$$\tilde{F} = [F_1, F_2], \text{ где } F_1 = \frac{2x_1 + 3x_2}{3x_1 + 4x_2},\ F_2 = \frac{4x_1 + 5x_2}{x_1 + x_2};$$

$$\tilde{\phi}_1 = [\phi_{11}, \phi_{12}], \text{ где } \phi_{11} = 2x_1 + 8x_2,\ \phi_{12} = 3x_1 + 12x_2;$$

$$\tilde{\phi}_2 = [\phi_{21}, \phi_{22}], \text{ где } \phi_{21} = x_1 + x_2,\ \phi_{22} = 2x_1 + 2x_2;$$

$$\tilde{\phi}_3 = [\phi_{31}, \phi_{32}], \text{ где } \phi_{31} = 12x_1 + 3x_2,\ \phi_{32} = 16x_1 + 4x_2.$$

*Шаг* 2. Формируем нижнюю и верхнюю граничные задачи решаемой интервальной задачи. Используя имеющиеся интервальные представления целевой функции $\tilde{F}$, функций ограничений $\tilde{\phi}_i$, $i = \overline{1,3}$, и параметров ограничений $\tilde{b}_i$, $i = \overline{1,3}$, по формулам (13), (14) получаем

$$\left.\begin{aligned}
&F_1(x_1,x_2) \equiv \frac{2x_1+3x_2}{3x_1+4x_2} = \max,\\
&\phi_{11}(x_1,x_2) = 2x_1+8x_2 \le 26,\\
&\phi_{12}(x_1,x_2) = 3x_1+12x_2 \le 48,\\
&\phi_{21}(x_1,x_2) = x_1+x_2 \ge 4,\\
&\phi_{22}(x_1,x_2) = 2x_1+2x_2 \ge 6,\\
&\phi_{31}(x_1,x_2) = 12x_1+3x_2 \le 39,\\
&\phi_{32}(x_1,x_2) = 16x_1+4x_2 \le 56,\\
&x_1 \ge 0, x_2 \ge 0.
\end{aligned}\right\} \text{– нижняя граничная задача,}$$

$$\left.\begin{aligned}
&F_2(x_1,x_2) \equiv \frac{4x_1+5x_2}{x_1+x_2} = \max,\\
&\phi_{11}(x_1,x_2) = 2x_1+8x_2 \le 26,\\
&\phi_{12}(x_1,x_2) = 3x_1+12x_2 \le 48,\\
&\phi_{21}(x_1,x_2) = x_1+x_2 \ge 4,\\
&\phi_{22}(x_1,x_2) = 2x_1+2x_2 \ge 6,\\
&\phi_{31}(x_1,x_2) = 12x_1+3x_2 \le 39,\\
&\phi_{32}(x_1,x_2) = 16x_1+4x_2 \le 56,\\
&x_1 \ge 0, x_2 \ge 0.
\end{aligned}\right\} \text{– верхняя граничная задача.}$$

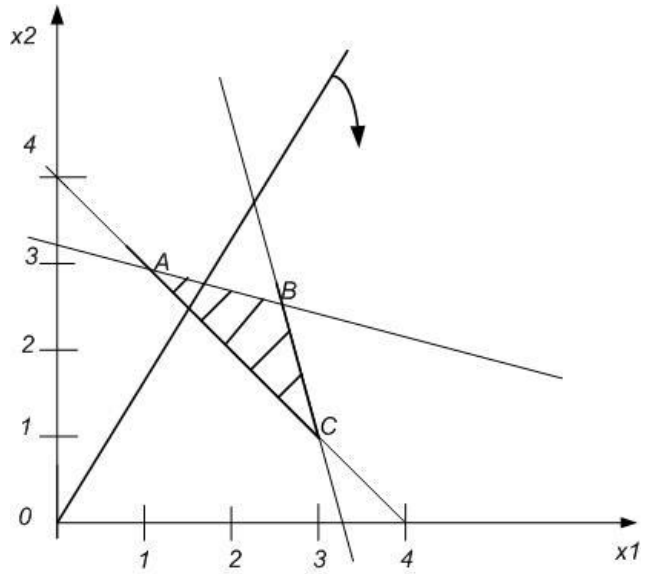



Рис. 1. Многоугольник допустимых решений

*Шаг* 3. Найдем решение нижней граничной задачи $\{M_н(x), F_{1,\max}\}$. Здесь $M_н(x)$ - множество точек решения $x=(x_1,x_2)$ этой задачи – в них целевая функция задачи $F_1$ достигает максимума $F_{1,\max}$. Начинаем с построения многоугольника допустимых решений. Решая систему 6 неравенств-ограничений задачи, получаем этот многоугольник в виде треугольника ABC (рис. 1). Теперь находим точки многоугольника, в которых $F_1 = F_{1,\max}$. Для этого

зададим значение целевой функции $F_1$ равным некоторому постоянному числу $h_0$:

$$F_1 = \frac{2x_1 + 3x_2}{3x_1 + 4x_2} = h_0 .$$

Пусть, например, $h_0 = 1$, тогда получим уравнение $2x_1 + 3x_2 = 3x_1 + 4x_2$ или $x_2 = -x_1$, что задает некоторую прямую на плоскости, проходящую через начало координат. Изменяя значения $h_0$, получим другие прямые, проходящие через начало координат и отличающиеся друг от друга углом наклона. Этот процесс равносилен вращению прямой. Будем вращать прямую вокруг начала координат в направлении движения часовой стрелки. Этому вращению соответствует уменьшение угла наклона прямой и, как следствие, уменьшение значения $h_0$. Поэтому следует остановить вращение, как только будет достигнута первая общая точка вращаемой прямой и многоугольника допустимых решений. Эта точка и дает максимум функции $F_1$. В данном случае максимум целевой функции $F_1$ находится в точке $A(1;\ 3)$, а максимальное значение целевой функции равно $F_{1,\max} = 11/15$. Других точек максимума у функции $F_1$ нет.

Решим теперь верхнюю граничную задачу. Так как система ограничений этой задачи такая же, как и в нижней граничной задаче, ее многоугольник допустимых решений опять дается треугольником ABC на рис. 1. Найдем точки многоугольника, в которых целевая функция задачи достигает максимума $F_2 = F_{2,\max}$. Действуем, как в случае нижней граничной задачи. Некоторому постоянному числу зададим значение целевой функции $F_2$ верхней граничной задачи равным $h_0$

$$F_2 = \frac{4x_1 + 5x_2}{x_1 + x_2} = h_0 .$$

Пусть, например, $h_0 = 1$, тогда получим уравнение $4x_1 + 5x_2 = x_1 + x_2$ или $4x_2 = -3x_1$, что задает некоторую прямую на плоскости, проходящую через начало координат. Аналогично предыдущему, будем вращать прямую вокруг начала координат в направлении движения часовой стрелки. Первая общая точка вращаемой прямой и многоугольника допустимых решений даст максимум $F_{2,\max}$ целевой функции $F_2$. В нашем случае максимум целевой функции $F_2$ оказывается в той же точке $A(1, 3)$, что и максимум целевой функции нижней граничной задачи $F_1$. Достигаемое в этой точке максимальное значение целевой функции верхней граничной задачи равно $F_{2,\max} = 19/4$. Других точек максимума у функции $F_2$ нет.

*Шаг* 4. В качестве точки решения интервальной задачи (16), (17) берем единственную общую точку множеств точек решения нижней и верхней граничных задач, т.е. точку $x^* = A(1,\ 3)$, а в качестве интервального максимума $\tilde{F}_{\max}$ интервальной целевой функции этой задачи $\tilde{F}$ - интервал

$\tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]$, составленный из максимальных значений $F_{1,\max} = 11/15$, $F_{2,\max} = 19/4$ целевых функций $F_1$, $F_2$ ее нижней и верхней граничных задач, достигаемых в общей точке максимума $x^*$. Таким образом, решение интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (16), (17)

$$\{x^* = (1,3), \tilde{F}_{\max} = [11/15, 19/4]\}. \tag{18}$$

Методика решения интервальной задачи дробно-линейного математического программирования, основанная на методе математической детерминизации – общем методе решения произвольных интервальных задач условной оптимизации – была изложена выше на примере задачи с двумя переменными. Наличие лишь двух переменных существенно облегчало представление и решение данной задачи путем ее геометрической интерпретации. Однако в общем случае, при произвольном числе переменных *n*, геометрическое представление и решение задачи дробно-линейного математического программирования не представляется возможным. В связи с этим возникает необходимость аналитического представления и решения указанной задачи.

## 4. Алгоритм математического моделирования и оптимизации себестоимости (эффективности) продукции производственных систем с произвольным числом выпускаемых изделий

Как уже говорилось выше (см. п. 1), общая задача дробно-линейного математического программирования в детерминированной постановке при произвольном числе переменных *n*, состоит в нахождении максимального значения дробно-линейной функции

$$F = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_j x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_j x_j} \tag{19}$$

при линейных ограничениях

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le b_i \quad (i = \overline{1,m}), \; x_j \ge 0 \; (j = \overline{1,n}), \tag{20}$$

где $c_j, d_j, b_i, a_{ij}$ – некоторые постоянные положительные числа. Также предполагается, что знаменатель целевой функции $\sum_{j=1}^{n} d_j x_j$ всегда неотрицателен и кроме того, не равен 0 в области неотрицательных решений системы линейных уравнений (20). Решение этой задачи имеет своей целью максимизировать удельную эффективность выпускаемых изделий, приходящуюся на единицу затрат, связанных с производством изделий.

Рассмотрим теперь общий недетерминированный (интервальный) вариант задачи (19), (20), состоящий в определении максимального значения интервального обобщения детерминированной целевой функции (19), т.е. интервальной дробно-линейной целевой функции

$$\tilde{F} = \frac{\sum_{j=1}^{n} \tilde{c}_j x_j}{\sum_{j=1}^{n} \tilde{d}_j x_j}, \tag{21}$$

при линейных интервальных ограничениях

$$\tilde{\phi}_i \equiv \sum_{j=1}^{n} \tilde{a}_{ij} x_j \le \tilde{b}_i \quad (i = \overline{1,m}), \quad x_j \ge 0 \quad (j = \overline{1,n}), \tag{22}$$

где коэффициенты целевой функции и ограничений $\tilde{c}_j$ и $\tilde{d}_j$ $\tilde{b}_i$, $\tilde{a}_{ij}$ - интервалы вида $\tilde{c}_j = [c_{j1}, c_{j2}]$, $\tilde{d}_j = [d_{j1}, d_{j2}]$, $\tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}]$, $\tilde{a}_{ij} = [a_{ij1}, a_{ij2}]$, в которых $c_{j1}$, $d_{j1}, a_{ij1}$, $b_{i1}$ – минимальные значения интервальных коэффициентов (нижние границы интервалов), а $c_{j2}$, $d_{j2}$ $a_{ij2}$, $b_{i2}$ - максимальные значения интервальных коэффициентов (верхние границы интервалов). Будем считать, что знаменатель целевой функции (21) всегда неотрицателен и, кроме того, не равен 0 в области неотрицательных решений системы линейных неравенств (22).

Аналогично случаю $n = 2$ (см. п. 2) будем решать поставленную интервальную задачу методом математической детерминизации, т.е. сведением к двум аналогичным детерминированным задачам. При этом алгоритм решения задачи в случае $n = 2$ переменных, приведенный в п. 4, сохраняется. Однако конкретные выражения целевых функций и функций ограничений изменяются, в связи с возможностью произвольного числа переменных $n$.

Алгоритм решения общей интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (21), (22) с произвольным числом переменных $n$ выглядит следующим образом [9, 10].

*Шаг* 1. Используя формулы интервальной математики, выражающие элементарные преобразования интервалов [9, 10], выразим интервальные целевую функцию $\tilde{F}$, функции ограничений $\tilde{\phi}_i$ и параметры $\tilde{b}_i$ решаемой задачи (21), (22) в интервальной форме

$$\begin{aligned} &\tilde{F} = [F_1, F_2]; \\ &\tilde{\phi}_i = [\phi_{i1}, \phi_{i2}], i = \overline{1,m}; \\ &\tilde{b}_i = [b_{i1}, b_{i2}], i = \overline{1,m}. \end{aligned} \tag{23}$$

Так как интервальная целевая функция $\tilde{F}$ является нелинейной и представляет собой отношение двух линейных функций с положительными коэффициентами и неотрицательными переменными (21), то ее нижняя граничная функция $F_1$ может быть получена при замене всех интервальных коэффициентов числителя целевой функции их нижними границами, а всех интервальных коэффициентов знаменателя целевой функции их верхними границами. Верхняя граничная функция $F_2$ целевой функции $\tilde{F}$ может быть получена при замене всех интервальных коэффициентов числителя целевой функции их верхними границами, а всех интервальных коэффициентов знаменателя целевой функции их нижними границами.

Таким образом, получаем выражения указанных функций в виде

$$F_1 = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j1} x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j2} x_j}, \; F_2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j2} x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j1} x_j}. \tag{24}$$

Далее, так как произвольная интервальная *i*-ая функция ограничений $\tilde{\phi}_i$ есть линейная функция с положительными коэффициентами и неотрицательными переменными (22), то ее нижняя $\phi_{i1}$ и верхняя $\phi_{i2}$ граничные функции имеют вид следующих выражений

$$\phi_{i1} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij1} x_j \,, \; \phi_{i2} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij2} x_j \,, \; i = \overline{1,m}. \tag{25}$$

Таким образом, интервальная форма максимизируемой целевой функции $\tilde{F}$ решаемой задачи (21), (22) имеет вид интервала (23), нижняя и верхняя границы которого выражаются формулами (24), т.е. имеет вид

$$\tilde{F} = \left[ F_1 = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j1} x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j2} x_j}, F_2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j2} x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j1} x_j} \right]. \tag{26}$$

Аналогично, интервальная форма произвольной *i*-й функции ограничений $\tilde{\phi}_i$ решаемой задачи имеет вид интервала (23), нижняя и верхняя границы которого выражаются формулами (25), т.е. имеют вид

$$\tilde{\phi}_i = \left[ \phi_{i1} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij1} x_j, \phi_{i2} = \sum_{j=1}^{n} a_{ij2} x_j \right], \; i = \overline{1,m}. \tag{27}$$

*Шаг* 2. Используя полученные на шаге 1 интервальные представления целевой функций $\tilde{F}$, функции ограничения $\tilde{\phi}_i$ и параметров ограничений $\tilde{b}_i$, строим нижнюю и верхнюю граничные задачи решаемой задачи (21), (22):

$$\left.\begin{aligned} & F_1(x_1,...,x_n) \equiv \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j1} x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j2} x_j} = \max, \\ & \phi_{i1}(x_1,...,x_n) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij1} x_j \le b_{i1}, i = \overline{1,m}, \\ & \phi_{i2}(x_1,...,x_n) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij2} x_j \le b_{i2}, i = \overline{1,m}, \\ & x_j \ge 0, \; j = \overline{1,n} \end{aligned}\right\} \text{– нижняя граничная задача,} \tag{28}$$

$$\left.\begin{aligned} &F_2(x_1,...,x_n) \equiv \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j2}x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j1}x_j} = \max, \\ &\phi_{i1}(x_1,...,x_n) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij1}x_j \le b_{i1}, i=\overline{1,m}, \\ &\phi_{i2}(x_1,...,x_n) = \sum_{j=1}^{n} a_{ij2}x_j \le b_{i2}, i=\overline{1,m}, \\ &x_j \ge 0,\ j=\overline{1,n}. \end{aligned}\right\} \text{– верхняя граничная задача.} \qquad (29)$$

*Шаг* 3. Используя подходящий метод решения детерминированных задач условной оптимизации, находим решение нижней $\{M_н(x), F_{1,\max}\}$ и верхней $\{M_в(x), F_{2,\max}\}$ граничных задач. Здесь $M_н(x)$ - множество точек решения $x=(x_1,\ldots,x_n)$ нижней граничной задачи, а $F_{1,\max}$ - достигаемое в них максимальное значение целевой функции $F_1$ этой задачи; $M_в(x)$ - множество точек решения $x=(x_1,\ldots,x_n)$ верхней граничной задачи, а $F_{2,\max}$ - достигаемое в них максимальное значение целевой функции $F_2$ этой задачи.

*Шаг* 4. Беря в качестве точки решения интервальной задачи (21), (22) любую точку $x^*=(x_1^*,...,x_n^*)$ из пересечения множеств $M_н(x)$ и $M_в(x)$, в качестве нижней границы интервала-максимума $\tilde{F}_{\max}$ интервальной целевой функции $\tilde{F}$ этой задачи максимум $F_{1,\max}$ целевой функции нижней граничной задачи, а в качестве верхней границы того же интервала-максимума $\tilde{F}_{\max}$ - максимум $F_{2,\max}$ целевой функции верхней граничной задачи, получаем полное решение интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (21), (22) в виде

$$\{x^* \in M_н(x) \cap M_в(x), \tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]\}. \qquad (30)$$

Из приведенного алгоритма следует, что для решения общей интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (21), (22) необходимо решить две граничные детерминированные задачи условной оптимизации– нижнюю граничную (28) и верхнюю граничную (29), после чего соединить оба решения в одно согласно (30).

*Задача* 1 (*нижняя граничная задача*): найти максимум целевой функции (28)

$$F_1 = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j1}x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j2}x_j}, \qquad (31)$$

при линейных ограничениях

$$\phi_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij}x_j \le b_i \quad (i=\overline{1,m}),\ \ x_j \ge 0 \quad (j=\overline{1,n}). \qquad (32)$$

Эта задача представляет собой усеченный вариант полной нижней граничной задачи (28), в которой исключены $m$ из $2m$ имевшихся в (28) линейных ограничений, что не снижает общности рассмотрения, поскольку все $2m$ ограничений в (28) принадлежат к одному и тому же типу. Сформулированная задача (31), (32) может быть сведена к задаче линейного программирования. Для того чтобы показать это, обозначим

$$y_0 = \left\{ \sum_{j=1}^{n} d_{j2} x_j \right\}^{-1}, \tag{33}$$

и введем новые переменные $y_0, y_1, ..., y_n$ согласно (33) и (34)

$$y_j = y_0 \cdot x_j, \ (j = \overline{1,n}). \tag{34}$$

Используя новые переменные, сведем задачу 1 к следующей новой задаче: найти максимум целевой функции

$$F_1^* = \sum_{j=1}^{n} c_{j1} y_j, \tag{35}$$

при линейных ограничениях

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} y_j \le b_i y_0, \ i = \overline{1,m},$$

$$\sum_{j=1}^{n} d_{j2} y_j = 1, \ y_j \ge 0 \ (j = \overline{1,n}), \ y_0 \ge 0. \tag{36}$$

Легко видеть, что задача (35)-(36) является задачей линейного программирования с новыми переменными $y_0, y_1, ..., y_n$. Следовательно, ее решение можно найти соответствующими известными методами решения задач линейного программирования [6]. Найдя оптимальное решение задачи (35)-(36), на основе соотношений (33), (34) получаем оптимальное решение задачи 1. При этом полученное максимальное значение $F_{1,\max}$ целевой функции $F_1$ задачи 1 - нижней граничной задачи исходной интервальной задачи (21), (22) - является, согласно шагу 4 описанного выше алгоритма, нижней границей искомого интервального максимального значения $\tilde{F}_{\max}$ целевой функции (21) исходной задачи.

*Задача* 2 (*верхняя граничная задача*)*:* найти максимум целевой функции

$$F_2 = \frac{\sum_{j=1}^{n} c_{j2} x_j}{\sum_{j=1}^{n} d_{j1} x_j}, \tag{37}$$

при линейных ограничениях

$$\tilde{\phi}_i = \sum_{j=1}^{n} a_{ij} x_j \le b_i \ \ (i = \overline{1,m}), \ \ x_j \ge 0 \ \ (j = \overline{1,n}). \tag{38}$$

Эта задача, аналогично задаче 1 (нижней граничной задаче) является усеченным вариантом полной верхней граничной задачи (29), в котором исключены $m$ из $2m$ имевшихся в (29) линейных ограничений, что не ограничивает общности рассмотрения, так как все $2m$ ограничений в (29)

принадлежат к одному и тому же типу. Сформулированная задача (37), (38), как и задача 1, может быть сведена к задаче линейного программирования. Для того, чтобы показать это, обозначим

$$y_0 = \left( \sum_{j=1}^{n} d_{j1} x_j \right)^{-1}, \tag{39}$$

и введем новые переменные $y_0, y_1, ..., y_n$ согласно (39) и (40)

$$y_j = y_0 \cdot x_j, \ (j = \overline{1,n}). \tag{40}$$

Используя новые переменные, сведем задачу 2 к следующей новой задаче: найти максимум целевой функции

$$F_2^* = \sum_{j=1}^{n} c_{j2} y_j, \tag{41}$$

при линейных ограничениях

$$\sum_{j=1}^{n} a_{ij} y_j \le b_i y_0, \ i = \overline{1,m},$$

$$\sum_{j=1}^{n} d_{j1} y_j = 1, \ y_j \ge 0 \ (j = \overline{1,n}), \ y_0 \ge 0. \tag{42}$$

Легко видеть, что задача (41), (42) является задачей линейного программирования с новыми переменными $y_0, y_1, ..., y_n$. Эту задачу, как и задачу (35), (36), решаем известными методами решения задач линейного программирования. Найдя оптимальное решение задачи (41), (42), из соотношений (39), (40) получаем оптимальное решение задачи 2. При этом получаем максимальное значение $F_{2,\max}$ целевой функции $F_2$ задачи 2 - верхней граничной задачи исходной интервальной задачи (21), (22). Это значение является, согласно шагу 4 описанного выше алгоритма, верхней границей искомого интервального максимального значения $F_{\max}$ целевой функции (21) исходной задачи.

Для получения полного решения исходной интервальной задачи дробно-линейного математического программирования (21), (22) необходимо еще иметь множества точек решения $M_н(x)$ и $M_в(x)$ нижней и верхней граничных задач исходной задачи (21), (22). При этом согласно шагу 4 алгоритма в качестве точки решения $x^*$ задачи (21), (22) берется любая точка пересечения множеств $M_н(x)$ и $M_в(x)$, а в качестве соответствующего точке $x^*$ интервального максимума $\tilde{F}_{\max}$ целевой функции $\tilde{F}$ (21) при заданных ограничениях (22) - интервал $\tilde{F}_{\max} = [F_{1,\max}, F_{2,\max}]$, где $F_{1,\max}$ - решение нижней граничной задачи (задачи 1), $F_{2,\max}$ - решение верхней граничной задачи (задачи 2).

## 5. Пример решения задачи моделирования и оптимизации себестоимости (эффективности) продукции производственной системы с несколькими видами изделий выпускаемой продукции

Найдем максимальное значение интервальной дробно-линейной функции

$$\tilde{F} = \frac{\tilde{c}_1 x_1 + \tilde{c}_2 x_2 + \tilde{c}_3 x_3}{\tilde{d}_1 x_1 + \tilde{d}_2 x_2 + \tilde{d}_3 x_3}, \tag{43}$$

при линейных ограничениях

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 + x_3 \le 300 \\ x_1 + 2x_3 \le 70 \\ x_1 + 2x_2 + x_3 \le 340 \end{cases}. \tag{44}$$

Здесь интервальные коэффициенты в целевой функции (43): $\tilde{c}_1 = [8,9]$, $\tilde{c}_2 = [3,5]$, $\tilde{c}_3 = [2,3]$, $\tilde{d}_1 = [1,3]$, $\tilde{d}_2 = [1,4]$, $\tilde{d}_3 = [1,1]$, в то время как коэффициенты в ограничениях (44) – точно заданные числа. Переменные $x_j$ в (44) могут принимать лишь неотрицательные значения.

Таким образом, математическая постановка задачи состоит в определении неотрицательного решения системы трех линейных неравенств (44), при котором достигается максимум интервальной дробно-линейной функции $\tilde{F}$ (43). Содержательный смысл данной задачи состоит в максимизации удельной (приходящейся на единицу затрат) эффективности продукции производственной системы с тремя видами выпускаемых изделий путем оптимизации плана выпуска $x = (x_1, x_2, x_3)$. При этом удельная эффективность продукции моделируется интервальной дробно-линейной функцией $\tilde{F}$ (43), а ограничения на время использования каждого *i*-го вида оборудования – *i*-м неравенством (44) (подробнее см. п. 1)

Для решения задачи применим описанный алгоритм [11]. Решим сначала нижнюю граничную задачу исходной задачи (43), (44) (задача 1). Введем целевую функцию этой задачи $F_1$ как значение целевой функции $\tilde{F}$ (43) исходной интервальной задачи при нижних границах интервальных коэффициентов $\tilde{c}_i$ ее числителя и верхних границах интервальных коэффициентов $\tilde{d}_i$ ее знаменателя

$$F_1 = \frac{8x_1 + 3x_2 + 2x_3}{3x_1 + 4x_2 + x_3}. \tag{45}$$

Далее в ограничениях (44) исходной интервальной задачи перейдем от неравенств к равенствам, введя для этого дополнительные переменные

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 300 \\ x_1 + 2x_3 + x_5 = 70 \\ x_1 + 2x_2 + x_3 + x_6 = 340 \\ x_j \ge 0,\ j = \overline{1,6} \end{cases}. \tag{46}$$

Введем базовую новую переменную $y_0 = \dfrac{1}{3x_1 + 4x_2 + x_3}$. Перейдем к остальным новым переменным по формуле $y_j = x_j y_0$.

В результате целевая функция нижней граничной задачи и ее система ограничений в терминах новых переменных запишутся в виде

$$F_1 = 8y_1 + 3y_2 + y_3$$

$$\begin{cases} 2y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - 300y_0 = 0 \\ y_1 + 2y_3 + y_5 - 70y_0 = 0 \\ y_1 + 2y_2 + y_3 + y_6 - 340y_0 = 0 \\ 3y_1 + 4y_2 + y_3 = 1 \\ y_j \geq 0,\ j = \overline{1,6} \end{cases}. \qquad (47)$$

Теперь нужно решить задачу линейного программирования (47): найти максимум линейной функции $F_1$ при заданной системе линейных ограничений. Решив эту задачу симплекс-методом, получим следующие значения переменных: $y_1 = 1/3$, $y_2 = 0$, $y_3 = 0$, $y_0 = 1/210$.

Сделав возврат к исходным переменным, получим следующее решение в виде точки: ($x_1 = 70$, $x_2 = 0$, $x_3 = 0$). Максимальное значение целевой функции, достигаемое в этой точке, $F_{1,\max} = 8/3$.

Решим теперь верхнюю граничную задачу исходной задачи (43), (44). Введем целевую функцию $F_2$ как значение целевой функции $\tilde{F}$ (43) исходной интервальной задачи при верхних границах интервальных коэффициентов $\tilde{c}_i$ ее числителя и нижних границах интервальных коэффициентов $\tilde{d}_j$ ее знаменателя

$$F_2 = \frac{9x_1 + 5x_2 + 3x_3}{x_1 + x_2 + x_3}. \qquad (48)$$

От неравенств (44) перейдем к равенствам, введя дополнительные переменные

$$\begin{cases} 2x_1 + x_2 + x_3 + x_4 = 300 \\ x_1 + 2x_3 + x_5 = 70 \\ x_1 + 2x_2 + x_3 + x_6 = 340 \\ x_j \geq 0,\ j = \overline{1,6} \end{cases}. \qquad (49)$$

Введем новую переменную $y_0 = \dfrac{1}{x_1 + x_2 + x_3}$ и перейдем к новым переменным по формуле $y_j = x_j y_0$. Тогда целевая функция задачи $F_2 = 9y_1 + 5y_2 + 3y_3$.

Запишем систему ограничений в новых переменных

$$\begin{cases} 2y_1 + y_2 + y_3 + y_4 - 300y_0 = 0 \\ y_1 + y_3 + y_5 - 70y_0 = 0 \\ y_1 + 2y_2 + y_3 + y_6 - 340y_0 = 0 \\ y_1 + y_2 + y_3 = 1 \\ y_i \geq 0 \end{cases}. \quad (50)$$

Решив получившуюся задачу симплекс-методом, получим следующие значения переменных $y_1 = 1$, $y_2 = 0, y_3 = 0, y_0 = 1/70$. Сделав возврат к исходным переменным, получим следующее решение верхней граничной задачи в виде точки ($x_1 = 70$, $x_2 = 0$, $x_3 = 0$). Соответствующее максимальное значение целевой функции задачи $F_{2max} = 9$.

Искомый максимум $\tilde{F}_{\max}$ интервальной целевой функции $\tilde{F}$ (43) при заданных ограничениях (44) находится в общей точке (70; 0; 0) решения двух граничных задач – нижней и верхней, а сам максимум целевой функции $\tilde{F}_{\max}$ получается соединением двух максимальных значений целевых функций $\tilde{F}_{1\max}$, $\tilde{F}_{2\max}$ двух указанных граничных задач $\tilde{F}_{\max} = [F_{1\max}, F_{2\max}] = \left[\frac{8}{3}, 9\right]$.

Содержательный смысл полученного решения состоит в том, что для максимизации удельной эффективности продукции данной производственной системы следует принять такой план выпуска продукции: изделие первого вида выпускается в количестве 70 единиц, а изделия второго и третьего видов не выпускаются вовсе. При этом достигается максимальное значение удельной эффективности выпускаемой продукции, оцениваемое следующим интервалом возможных значений этого показателя $\tilde{F} = [2{,}66;\ 9]$.

## Заключение

В статье показано, что задача оптимизации неполностью определенных нелинейных функций довольно просто решаема, если неопределенность задана в интервальной форме, а для решения используется теория сравнения интервальных величин, которая сводит указанное сравнение к сравнению одноименных границ интервалов. Благодаря такому подходу нахождение оптимума неполностью определенной нелинейной функции сводится к нахождению одноименного оптимума двух полностью определенных (нелинейных) функций. Такой подход, который естественно называть детерминизацией, характерен тем, что дает возможность вполне строго сводить оптимизацию неполностью определенных нелинейных функций к хорошо известным и достаточно эффективным методам оптимизации детерминированных нелинейных функций.

## Литература

1. Левин В. И. Булево линейное программирование с интервальными коэффициентами // Автоматика и телемеханика. 1994. № 7. С. 111-122.

2. Левин В. И. Дискретная оптимизация в условиях интервальной неопределенности // Автоматика и телемеханика. 1992. № 7. С. 97-106.

3. Левин В. И. Сравнение интервальных чисел и оптимизация систем с интервальными параметрами // Автоматика и телемеханика. 2004. № 4. С. 133-143.

4. Левин В. И. Упрощенная методика оптимизации систем в условиях интервальной неопределенности // Информационные технологии. 2012. № 12. С. 19-24.

5. Левин В. И. Непрерывная логика. Ее обобщения и применения. Часть 1 // Автоматика и телемеханика. 1990. № 8. С. 3-22.

6. Левин В. И. Непрерывная логика. Ее обобщения и применения. Часть 2 // Автоматика и телемеханика. 1990. № 9. С. 3-26.

7. Кузнецов А. В. Математическое программирование. М.: Лань, 2010. 351 с.

8. Немкова Е. А., Левин В. И. Интервальная задача дробно-линейного программирования // Обозрение прикладной и промышленной математики: научно-технический журнал. 2006. Т. 13. № 4. С. 666.

9. Немкова Е. А., Левин В. И. Интервальная задача дробно-линейного программирования. Графическое решение. // Сборник трудов международной конференции «Ресурсосбережение в химической технологии». СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2012. С. 63-65.

10. Немкова Е. А., Левин В. И. Решение интервальной задачи дробно-линейного программирования // Математические методы в технике и технологиях (ММТТ-24): сб.трудов XXIV Междунар. науч.конф.: в 10 т. Т.2. – Киев: Национ. техн. ун-т Украины «КПИ», 2011. – С. 12-14.

11. Немкова Е. А., Левин В. И. Решение интервальной задачи дробно-линейного программирования сведением к задаче линейного программирования // Молодой ученый. 2011. Т. 1. № 8(31). С. 30-34.

12. Немкова Е.А., Левин В.И. Решение интервальной задачи квадратичного программирования методом детерминизации // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2012. Т. 18. № 1. С. 203-211.

## References

1. Levin V. I. Boolean linear programming with interval coefficients. *Automation and Remote Control*, 1994, no. 7, pp. 111-122.

2. Levin V. I. Discrete optimization in the conditions of interval uncertainty. *Automation and Remote Control*, 1992, no. 7, pp. 97-106.

3. Levin V. I. Comparison of interval numbers and optimization of systems with interval parameters. *Automation and Remote Control*, 2004, no. 4, pp. 133-143.

4. Levin V. I. The simplified technique of optimization of systems in the conditions of interval uncertainty. *Information technologies*, 2012, no. 12, pp. 19-24 (in Russian).

5. Levin V. I. Continuous logic. Its generalizations and application. *Automation and Remote Control*, 1990, no. 8, pp. 3-22.

6. Levin V. I. Continuous logic. Its generalizations and application. *Automation and Remote Control*, 1990, no. 9, pp. 3-26.

7. Kuznetsov A. V Mathematical programming. Moscow, Lan Publ., 2010, 351 p. (in Russian).

8. Nemkova E. A., Levin V. I. Interval problem of fractional and linear programming. *Review of applied and industrial mathematics*, 2006, vol.13, no. 4, p. 666 (in Russian).

9. Nemkova E. A., Levin V. I. Interval problem of fractional and linear programming. Graphic decision. *Collection of works of the international conference "Resource-saving in Chemical Technology*, 2012, pp. 63-65 (in Russian).

10. Nemkova E. A., Levin V. I. The solution of an interval problem of fractional and linear programming. *Mathematical methods in equipment and technologies*, 2011, vol. 2, pp. 12-14 (in Russian).

11. Nemkova E. A., Levin V. I. The solution of an interval problem of fractional and linear programming by data to a problem of linear programming. *Young Scientist*, 2011, vol. 1, no. 8, pp. 30-34 (in Russian).

12. Nemkova E. A., Levin V. I. Solution of an interval problem of square programming by a determinization method. *Vestnik of the Tambov State Technical University*, 2012, vol. 18, no. 1, pp. 203-211 (in Russian).

## Информация об авторах

*Левин Виталий Ильич* – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. Тел. +7 9270950686. E-mail: vilevin@mail.ru

*Немкова Елена Анатольевна* – кандидат технических наук. Пензенский государственный технологический университет. Доцент кафедры «Математика». Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике. Тел. +7(8412) 208-610. E-mail: elenem58@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

## Interval Problem of Optimization of Prime Cost and Efficiency of Production

V. I. Levin, E. A. Nemkova

***Relevance.*** *In article the existing approaches to an actual problem of optimization of prime cost and efficiency of production released by the production systems functioning in the conditions of uncertainty are considered. The exact problem definition of conditional optimization of prime cost and efficiency of production of a production system at interval uncertainty of parameters is given function and restrictions. Criterion function of system is considered nonlinear.* ***The purpose.*** *The aim of the article is to propose of idea of the solution of a problem of conditional nonlinear optimization of system at interval uncertainty of its parameters. This idea is based on rules of the mathematical theory of comparison of the intervals allowing to*

*replace comparison of intervals and allocation of a bigger (smaller) interval with comparison of their lower and upper bounds and allocation of bigger (smaller) border.* ***Method****. On the basis of the stated idea the method of a determinization of the solution of a problem of conditional nonlinear optimization at interval uncertainty of parameters of the optimized system by its data to two completely certain problems of conditional optimization of the same type is formulated and reasonable.* ***Novelty****. It is formulated and proved the offer defining the solution of a problem of conditional nonlinear optimization at interval uncertainty of parameters of the optimized system through solutions of two completely certain problems of optimization of the same type. It is also formulated and proved the theorem defining a necessary and sufficient condition of existence of the solution of a problem of conditional nonlinear optimization at interval uncertainty of its parameters.* ***Result.*** *The algorithm of the solution of a problem of conditional nonlinear optimization at interval uncertainty of parameters of the optimized system which is based on a determinization method is constructed. The example of work of algorithm is given. Comparison of the offered approach to the solution of problems of conditional nonlinear optimization with other approaches is carried out. Merits and demerits of various approaches are specified.*

***Keywords****: nonlinear optimization, uncertainty, optimization at interval uncertainty, a determinization method.*

## Informaion about Authors

*Vitaly Ilyich Levin* – the Doctor of Engineering, Professor, PhD, Full Professor. Honored worker of science of the Russian Federation. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economy, sociology, history; decision-making; optimization; automata theory; theory of reliability; history of science; problems of education. Tel.: +79270950686. E-mail: vilevin@mail.ru

*Elena Anatolyevna Nemkova* – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor at the Department of «Mathematics». Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economy. Tel. +7(8412)208-610. E-mail: elenem58@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova/ Gagarin st., 1a/11.

УДК 004.056

# Логико-вероятностно-информационный подход к формированию единого алгоритма исследований информационной безопасности объектов защиты

Жидко Е. А.

***Постановка задачи:*** *В доктрине информационной безопасности РФ отмечаются недостатки в её обеспечении на современном этапе. Один из них, это: «противоречивость и неразвитость правового регулирования общественных отношений в информационной сфере, что приводит к серьезным негативным последствиям для личности, общества, государства.* ***Целью работы*** *является возможность создания единого логического подхода к исследованиям информационной безопасности объекта защиты при наличии угроз её нарушения с неприемлемыми последствиями.* ***Используемые методы:*** *методологию исследований по проблеме образуют методы вложений, аналогий, ассоциаций и асимптотического приближения теоретических и эффективных логико-лингвистических, семантических, математических методов моделирования, которые базируются на комплексировании методов моделирования по формуле Бэкуса-Наура.* ***Новизна:*** *формирование единого подхода к терминам информационной безопасности объекта базируется на синтаксическом, семантическом и математическом моделировании условно взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды объекта теоретическими, эвентологическими и эмпирическими методами, скоординированными по цели, месту и времени, диапазону условий и полю проблемных ситуаций.* ***Результат****: формируется теоретический подход к системному математическому описанию понятий информационной безопасности.* ***Практическая значимость****: единый подход к логическому описанию понятий в исследованиях информационной безопасности позволяет достоверно разрешать технические проблемы обеспечения их методами и средствами полезными с точки зрения достижения главной цели - защиты от угроз нарушения информационной безопасности объекта и обеспечения их устойчивого (антикризисного) развития в реально складывающейся и прогнозируемой обстановке XXI века.*

***Ключевые слова****: объект защиты, информационная безопасность, методы и системы моделирования.*

## Актуальность

На современном этапе одной из актуальных проблем обеспечения безопасного и устойчивого (антикризисного) развития хозяйствующих субъектов является их защищённость от угроз нарушения информационной безопасности (ИБ) с негативными последствиями для личности, общества, государства (ЛОГ) и самих субъектов [1]. Проблема должна решаться в контексте противоборства договаривающихся сторон на политической арене и конкурентной борьбы в социально-эколого-экономическом аспекте в условиях информационной войны (информационно-психологической, идеологической, кибернетической).

В интересах разрешения проблемы необходимо разработать научно-методическое обеспечение программы исследований ИБ приоритетных объектов защиты (ОЗ), заданных доктриной [1], на основе единого алгоритма и единой шкалы оценки защищённости объекта от названных угроз.

С этой целью следует максимально использовать достоинства накопленной базы знаний и ресурса в информационной сфере при сведении к минимуму её недостатков с точки рения достижения целей. Базу образуют

работы таких ведущих отечественных и зарубежных учёных в информационной сфере, как: Колмогоров А.Н. и Харкевич А.А., Валдайцев С.В., Ефремов В.С. и Саркисян С.А., Бажин И.И., Воробьев О.Ю., Заде Л. и Мазур М., Ансофф И. и Котлер Ф., Дойль П., Стрикленд А. и Томпсон А.А, Скрыль С.В., Киселев В.В., Джоган В.К, других [2-10].

В число приоритетных объектов защиты, согласно Доктрине [1], входят *системы управления экологически опасными и экономически важными производствами. Экономически важными производствами* (объектами) целесообразно считать те из них, которые способны обеспечить: потребности ЛОГ в необходимом и достаточном уровне, качестве и безопасности жизни; их устойчивое антикризисное развитие в новых условиях XXI века. *Экологически опасными* являются те экономически важные производства, которые оказывают на окружающую среду антропогенное воздействие, уровень которого превышает нормы экологической безопасности, создаёт угрозы качеству и безопасности жизни человека и природы.

## Методология формирования единого алгоритма

Предпрогнозные исследования современной теории и практики математического моделирования взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды ОЗ в интересах обеспечения устойчивости их развития показали следующее [11-16].

1. Методологию разрешения проблемы ИБ приоритетных ОЗ целесообразно строить на основе комплексирования методов теории четких и нечетких множеств, четкой и нечёткой логики, интеллектуальных систем, возможностей и риска, прогнозирования и принятия решений, оптимального управления. Методология должна обеспечить решение задач анализа ситуации и синтеза адекватной реакции на угрозы нарушения устойчивости развития объекта как функции его защищенности от угроз нарушения ИБ с негативными последствиями для ЛОГ.

На современном этапе решение такого класса задач базируется на синтаксическом, семантическом и математическом моделировании взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды объектов теоретическими, эвентологическими и эмпирическими методами, представленными в таблице 1 [14, 17].

Методы имеют различное целевое и функциональное назначение, а результаты их применения взаимно дополняют друг друга и базируются на основе применения норм ИБ ОЗ, принимающих следующий вид:

«эталон ± погрешности (допустимые, критические и/или неприемлемые)» адекватно степени секретности охраняемых сведений, относимых к государственной и/или коммерческой тайне.

**Достоверность и полезность таких норм** проверяются эмпирически с помощью численных методов. По результатам таких исследований при необходимости вводятся соответствующие корректировки и поправки в теоретические и эвентологические методы моделирования.

Таблица 1 – Комплекс методов моделирования

| Классы методов и моделей | Назначение методов и моделей |
|---|---|
| **Теоретические методы** | Предназначены для обоснования требований к адекватности реакции на угрозы нарушения ИБ ОЗ, его системы информационной безопасности (СИБ). **Моделирование** ИБ базируется на внедрении методов системного анализа возможных исходов дуэли между сторонами А и В в заданном контексте, аспектах и условиях с позиции ER концепции (сущности исследуемых событий, отношения между ними, влияющая на них атрибутика) на основе логико-вероятностно-информационного подхода и ветвлении главной цели ОЗ, его СИБ на частные.<br>Результаты такого системного анализа представляют в виде синтаксической модели ИБ ОЗ в виде скобочной конструкции, разработанной по правилу составления формулы Бэкуса-Наура. |
| **Эвентологические методы** | Предназначены для учёта влияния человеческого (промахи и ошибки), природного, других объективных и субъективных факторов на ситуацию и результаты (исходы дуэли). **Моделирование** базируется на методах теории нечётких множеств и нечёткой логики, интеллектуальных систем, возможностей и риска, прогнозирования и принятия решений, оптимального управления. |
| **Эмпирические методы** | Предназначены для оценки достоверности и полезности разработанных теоретических основ системного математического моделирования ИБ ОЗ, его СИБ. **Моделирование** базируется на векторной статистике и численных методах. |
| **Синтаксические модели** | Предназначены для выявления *сущности* реально складывающейся и прогнозируемой обстановки во внешней и внутренней среде объекта защиты в условиях XXI века. Исследования базируются на методах системного анализа, а его *результаты* оформляются *по правилу составления формулы Бэкуса-Наура.* |
| **Семантические модели** | Предназначены для выявления отношений между сущностями на основе *логико- вероятностно-информационного* подхода и *ветвления* главной цели защиты от рассматриваемых угроз (устойчивость развития) на локальные цели, адекватно принятой скобочной конструкции таких отношений |
| **Математические модели** | Разрабатываются по методу вложений критериев, методов и систем защиты информации адекватно формуле Бэкуса-Наура с учётом разработанной системы отношений между сущностями условно взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды объекта защиты по ситуации и результатам в условиях XXI века. |

2. В этом случае общая методология формирования единого алгоритма анализа ИБ объекта и синтеза адекватной реакции на угрозы её нарушения базируется на использовании для моделирования: ER концепции (сущность изучаемых процессов, отношение между ними, влияющая на них атрибутика), логико-вероятностно-информационного подхода к оценке защищенности ОЗ от угроз нарушения его ИБ и ветвления интегральной цели объекта (устойчивость его развития) на частные в заданном контексте, аспектах и условиях [14].

В едином алгоритме предусматривается выполнение следующей последовательности операций [18, 19]:

– моделирование ИБ ОЗ и прогнозирование последствий ее нарушений;
– мониторинг состояний внешней среды и контроль состояний внутренней среды ОЗ;

– диагноз состояний защищенности объекта от нарушений его ИБ, экспертиз состояний на соответствие требуемым, задание требований к эффективности методов и систем информационной безопасности (СИБ) ОЗ;
– оптимизация проектов облика ОЗ, его СИБ и траектории их устойчивого развития по ситуации и результатам в статике и динамике условий XXI века;
– управленческое консультирование по адекватной реакции на угрозы нарушения ИБ ОЗ в статике и динамике условий XXI века;

Реализация такого алгоритма базируется на введении лингвистической переменной, математическая модель которой по определению включает пять факторов, которая используется в теории эвентологии [4]. В нашем случае ими являются следующие.

2.1. Имя интегрального состояния объекта в виде скобочной конструкции: безопасность и устойчивость развития (БУР) ОЗ, как функция его конкурентоспособности (КСП), аргументом которой является качественное информационное обеспечение (ИО), необходимое и достаточное для достижения целей объекта. ИО в условиях информационной войны рассматривается как функция защищённости объекта от угроз нарушения его ИБ. Требования к уровню ИБ устанавливаются исходя из заданных норм защиты охраняемых сведений об объекте, которые относятся к государственной (особой важности, совершенно секретно, секретно) и/или коммерческой («ноу-хау») тайне. При этом на основе принципа обеспечения коллективной безопасности и взаимовыгодного сотрудничества договаривающихся сторон целесообразно учитывать возможность разрешения информационного конфликта (ИК), возникающего между ними из-за противоречий в их интересах. В результате названную выше скобочную конструкцию можно представить в виде аббревиатуры: БУР(КСП(ИО(ИБ(ИК))) ОЗ и его системы информационной безопасности (СИБ). Раскрыть сущности составляющих такой аббревиатуры, отношения между ними и влияющую на них атрибутику (согласно ER концепции) возможно в виде формулы Бэкуса-Наура по известному правилу, $G_{БНФ}$ [14]:

«в левой части указывается нетерминальное слово «имя состояния» ОЗ, его СИБ в рассматриваемой предметной области **::=** (по определению есть) далее приводится функционал и/или оператор (алгоритм), который отражает: *сущность* процессов, протекающих в трёхуровневой модели в виде скобочной конструкции БУР(КСП(ИО(ИБ(ИК)))) ОЗ, его СИБ; *отношения* между процессами внутри и между уровнями; влияющую на них *атрибутику*»

Другими словами, следуя данному правилу, разрабатывается синтаксическая модель заданной скобочной конструкции БУР(КСП(ИО(ИБ(ИК))) ОЗ, его СИБ. Фактически формула Бэкуса-Наура отражает *алгоритм системного синтаксического моделирования сущности* (то есть логики оценки).

Следует заметить, что данная формула является методом эвентологических системных исследований. Однако, она редко применяется на практике из-за недостаточной разработанности методологии системных исследований по проблеме с позиций логико-вероятностно-информационного подхода [3, 11].

2.2. Полный набор имён в заданном контексте, аспектах и условиях, который образует функционал $X(X_1, X_2, X_3)$. Формирование такого набора имён базируется на методологии [3], предусматривающей: ветвление «целей объекта по способам и средствам их достижения»; фильтрацию тех ветвей, которые близки к оптимальным по ситуации и результатам в статике и динамике условий XXI века; комментирование последствий от реализации различных ветвей по ситуации и результатам.

2.3. Вводятся градации имён возможных состояний объекта внутри предметных областей $X_1$ (противоборство), $X_2$ (конкурентная борьба), $X_3$ (информационная война). Градации образуют классификаторы $T(x) \in X_1$ «И» $T(x) \in X_2$ «И» $T(x) \in X_3$ по основаниям:

- цель, место и время действий, диапазон условий, поле проблемных ситуаций;
- природа и масштабы объекта, сложность его внешних и внутренних структурных связей, детерминированность и цикличность исследуемых процессов в заданном контексте, аспектах и условиях; их ИБ;
- причинно-следственные связи, движущие силы, генеральные цели, законы и закономерности взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды ОЗ, его СИБ.

2.4. Правила образования имён, $G$, в каждой группе исходя из синтаксической модели БУР(КСП(ИО(ИБ(ИК))) ОЗ, его СИБ, следуя правилу $G_{БНФ}$, и на основе разработки семантической модели отношений между состояниями внешней и внутренней среды ОЗ в статике и динамике условий XXI века.

2.5. Правила ассоциирования имён состояний объекта с адекватной реакцией на угрозы нарушения его ИБ, $M_{АР}$, в заданном контексте, аспектах и условиях. Правила устанавливаются по результатам исследований на математической модели ИБ ОЗ, его СИБ, которая разрабатывается на основе логико (синтаксис)-вероятностно-информационного (семантика) подхода к математическому моделированию взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды ОЗ, его СИБ. Методология разработки таких правил базируется на решении выше названных задач анализа и синтеза.

В результате введения лингвистической переменной по пунктам 2.1–2.5 наметился путь системного математического моделирования ИБ объекта с целью адекватной реакции на угрозы её нарушения. Реализация этого пути базируется на следующих предпосылках.

Объект исследований – информационная безопасность объекта защиты.

Предмет исследований – возможность обеспечения ИБ объекта в условиях XXI века.

Цель исследований – создание базы знаний, необходимой и достаточной для информационной и интеллектуальной поддержки требуемого уровня защищённости объекта от угроз нарушения его ИБ в реально складывающейся и прогнозируемой обстановке в статике и динамике условий XXI века [20-22].

Система ограничений на выбор адекватной реакции устанавливается в результате исследований по логической схеме:

– в статике: цель – ситуация – проблема – реакция на неё – побочные эффекты – их предупреждение и ликвидация негативных последствий, в том числе на основе корректировок и пересмотра целей, места и времени действий в заданном контексте, аспектах и условиях;
– в динамике: действие – противодействие – ответные меры и т.д.

В процессе системного моделирования необходимо учитывать также атрибутику, которая существенно влияет на исходы противоборства, конкурентной борьбы и информационной войны. В качестве такой атрибутики рассматриваются: внешняя и внутренняя политики договаривающихся сторон, действующие механизмы государственного регулирования и санкции за нарушения требований нормативно-правовых документов, человеческий и природный факторы, другие объективные и субъективные причины [13].

Задача исследований – создание теоретических основ формирования научно-методического обеспечения программы исследований ИБ приоритетных ОЗ, базирующейся на едином алгоритме и единой шкале оценки защищённости объекта от угроз нарушения его ИБ [23, 24].

## Методическое обеспечение формирования единого алгоритма

Следуя принципу максимального использования накопленной базы знаний и ресурса по проблеме, приходим к следующим выводам.

Для научного обоснования правил образования имён состояний объекта *G*, в рассматриваемой предметной области целесообразно на этапе синтаксического моделирования воспользоваться методами:

– *PEST анализа* (политика, экономика, социум, технологии) в заданном контексте в интересах прогноза исходов противоборства договаривающихся сторон на политической арене и адекватной реакции на них по ситуации и результатам. Здесь состояния экономики, социума и технологий оцениваются по уровням их развития в высокоразвитых, развитых, развивающихся и слаборазвитых странах, согласно градациям, принятым в ООН;
– *SEET анализа* (социум, экология, экономика, технологии) в заданных аспектах в интересах прогноза исходов конкурентной борьбы договаривающихся сторон в социально-эколого-экономической сфере, адекватной реакции на них. Здесь состояния социума, экологии, экономики и технологий рассматриваются применительно к конкретной стране на национальном, корпоративном и местном уровнях;

– *IT* (*IDEF*) *технологий* для менеджмента в интересах прогноза исходов информационной войны между договаривающимися сторонами, адекватной реакции на них.

Изучение закономерностей взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды ОЗ в этом случае показало, что имя исходов в предметной области целесообразно ассоциировать с адекватными им градациями имён состояний этих сред в заданном контексте, аспектах и условиях, несущих угрозы устойчивости развития объекта, как функции его защищённости от угроз нарушения ИБ (Таблица 2).

Таблица 2 – Градации имен состояний ОЗ

| Градации имен состояний ОЗ, его СИБ в вопросах: | | | | |
|---|---|---|---|---|
| внешней политики | социума | экологии | экономики | технологий |
| взаимовыгодное сотрудничество | процветание по уровню жизни | гармонизация отношений человека и природы | монополия | абсолютное превосходство в развитии |
| мирное сосуществование | стабильность общества | антропогенное воздействие на природу | лидерство | лидерство в развитии науки и технологий |
| нейтралитет | неопределен-ность | неопределен-ность | неопределен-ность | неопределен-ность |
| холодные войны | социальная напряженность | превышение норм экологической безопасности | предкризисное состояние | отставание в КСП развития технологий |
| вооруженные конфликты | социальный взрыв | природные катаклизмы | банкротство, кризис, крах | неразвитость |

В результате получены следующие выводы [14]:

– градации исходов противоборства ассоциируются с именами: наличие договорённостей о коллективной безопасности и взаимовыгодном сотрудничестве; мирное сосуществование стран с различным общественным и политическим устройством; «холодные» информационные войны с угрозой их перерастания в военные конфликты;
– градации исходов конкурентной борьбы в экономическом аспекте ассоциируются с монопольным или лидирующим состоянием объекта, его предкризисным состоянием или банкротством, угрозой перерастания локального кризиса в мировой;
– градации исходов конкурентной борьбы в экологическом аспекте ассоциируются с гармонизацией отношений человека с природой или стабильностью таких отношений, которая регулируется нормами

экологической безопасности; антропогенное воздействие человека на природу, превышающее нормы; природные катаклизмы;

– градации исходов конкурентной борьбы в социальной сфере ассоциируются с процветанием социума; наличием гражданского общества, в котором основная масса населения – это счастливые люди, которые «живут как все» (закон «10-80-10»); социальная напряжённость; социальный взрыв, несущий угрозу смены общественного и политического строя в стране. Сказанное иллюстрирует содержание таблицы 3.

Адекватная реакция на выше названные угрозы, согласно федеральному закону [25], ассоциируется с предупреждением ошибок вида упущенная выгода, причинённый ущерб лицами, принимающими решения (ЛПР).

Таблица 3 – Характеристики моделей в области противоборства, конкурентной борьбы, информационной войны

| Виды моделей функционала БУР(КСП(…ИБ…) | Характеристики моделей в области | | | Итог |
|---|---|---|---|---|
| | противоборства | конкурентной борьбы | Информационной войны | |
| Синтаксические модели по формуле Бэкуса-Наура | $PEST_{11}$ анализ Комплекс имен состояний $X_1$ | $SEET_{12}$ анализ Комплекс имен состояний $X_2$ | $IT(IDEF)_{13}$ Комплекс имен состояний $X_3$ | Полный набор имен, $X(X_1, X_2, X_3)$ |
| Семантические модели: (иерархические, функциональные, процессные) | $SWOT_{21}$ анализ Правила образования имен $G_1$ | $SWOT_{22}$ анализ Правила образования имен $G_2$ | $SWOT_{23}$ анализ Правила образования имен $G_3$ | Полный набор правил образования имен, $G(G_1, G_2, G_3)$ |
| Математические модели в виде скобочных конструкций функционала БУР(КСП(…ИБ…) | Формула правила ассоциирования имен с целью, $M_{AP1}$, по формуле Бэкуса-Наура $_{31}$ | Формула правила ассоциирования имен с целью, $M_{AP2}$, по формуле Бэкуса-Наура | Формула правила ассоциирования имен с целью, $M_{AP3}$, по формуле Бэкуса-Наура | Полный набор правил ассоциирования имен с целями $M_{AP}$ $(M_{AP1}, M_{AP2}, M_{AP3})$ |
| Итог | Комплекс моделей противоборства | Комплекс моделей конкурентной борьбы | Комплекс моделей информационной войны | Система моделей ИБ ОЗ, его СИБ |

В этом случае с целью научного обоснования правил ассоциирования имён с адекватной реакцией на угрозы нарушения ИБ объекта, $M_{AP}$, следует на этапе семантического моделирования воспользоваться методами:

– выявления причинно-следственных связей, движущих сил, генеральных целей, законов и закономерностей взаимосвязанного развития внешней и внутренней среды ОЗ в заданном контексте, аспектах и условиях [26, 27];

– SWOT анализа (сильные и слабые стороны, возможности и угрозы) и диагноза на этой основе состояний защищённости объекта от угроз

нарушения его ИБ, а затем экспертизы установленных состояний на соответствие требуемым. Выявленные диспропорции и результаты их сопоставления с допустимыми, критическими и неприемлемыми – основа для обоснования правил принятия решений по адекватности реакции на угрозы;

– введения системы показателей адекватности: чувствительность к мере информации, функция принадлежности градации состояния объекта к функции его полезности с точки зрения возможности достижения целей его защиты. Такая возможность реализуется на основе: предупреждения промахов и ошибок ЛПР; ликвидации их негативных последствий вида: причинённый ущерб, упущенная выгода, отсутствие необходимой реакции на них в реально складывающейся и прогнозируемой обстановке XXI века.

В результате сущность логико-вероятностно-информационного подхода принимает вид, приведенный в табл. 4.

Таблица 4 – Сущность логико-вероятностно-информационного подхода

| Сущности подхода: | | |
|---|---|---|
| **логико** | **вероятностно** | **информационного** |
| Синтаксическая модель по формуле Бекуса-Наура (ситуация) | Вероятности достижения целей объекта (семантика и математика) | Критерии оптимизации меры информации, адекватной заданному значению вероятности |
| Правила образования имен состояний объекта | Диагностика состояний, их экспертиза на соответствие требуемым | Экспертиза потенциально возможной и реально полученной меры информации на соответствие требуемой |
| Правила ассоциирования имён с адекватностью реакции на угрозы нарушения ИБ ОЗ | Требования к адекватности реакции на угрозы нарушения ИБ ОЗ | Задание на прогноз недостающей и малодостоверной информации |

Реализация такого подхода базируется на проведении аналогий между ситуацией и теоремами о вероятности логически связанных событий как функции меры информации: необходимой, потенциально возможной, реально полученной и практически использованной ЛПР. В этом случае критерий оптимизации меры информации, необходимой к практическому использованию для адекватной реакции на угрозы нарушения ИБ объекта принимает следующий вид [14].

Рассматривая выражение БУР(КСП(ИО(ИБ(ИК))) ОЗ в качестве генеральной цели развития объекта, следует провести сравнительный анализ следующих количественно-качественных логико-вероятностно-информационных характеристик:

– необходимо (*Н*) обеспечить состояние (требуемое имя) ::= (по определению есть) его количественно-качественные характеристики по форме: область их определения, $\Omega_{ГЦ}^{(H)}$, заданная для оценки

вероятности достижения генеральной цели объекта, $P_{ГЦ}^{(Н)}$, аргументом которой является область определения необходимой и достаточной меры исходной информации, $M(I_{ГЦ}^{(Н)})$:

$$Имя\ состояния ::= P_{ГЦ}^{(Н)}(\ M(I_{ГЦ}^{(Н)}) \in \Omega_{ГЦ}^{(Н)}; \quad (1)$$

– «И» потенциальных возможностей (*ПВ*) при накопленной в мире базе знаний и ресурса по проблеме:

$$ПВ ::= P_{ГЦ}^{(ПВ)}(M(I_{ГЦ}^{(ПВ)}) \in \Omega_{ГЦ}^{(ПВ)}; \quad (2)$$

– «И» реальная достижимость цели (РД) при имеющейся у объекта базе знаний и ресурса по проблеме ::= функция принадлежности способов и средств достижения цели $\mu_{ГЦ}^{(РД)}$, к функции их полезности в рассматриваемых контексте, аспектах и условиях:

$$РД ::= \mu_{ГЦ}^{(РД)} \in P_{ГЦ}^{(РД)}(M(I_{ГЦ}^{(РД)}) \in \Omega_{ГЦ}^{(РД)}. \quad (3)$$

Мера информации в выражениях (1)–(3) распознаётся на основе проведения аналогий между теоремами о вероятностях логически связанных событий и теоремами о мере информации (по ситуации), необходимой, потенциально возможной, реально полученной и практически использованной по ситуации и результатам для адекватной реакции на угрозы нарушения ИБ ОЗ. При наличии диспропорций между названными мерами: выявляются объективные и субъективные причины их появления; оценивается приемлемость последствий, вызванных установленными диспропорциями; принимаются адекватные меры по предупреждению порождающих их причин, ликвидации негативных последствий.

## Заключение

Таким образом, системное математическое моделирование ИБ ОЗ, его СИБ базируется на эффективном решении задач анализа ситуации и синтеза адекватной реакции на неё [14, 28]. Системообразующим фактором является процедура, которая базируется на ER концепции и усовершенствованном логико-вероятностно-информационном подходе к исследованиям, включает операции: ветвления целей объекта по средствам их достижения; фильтрации ветвей, близких к оптимальным по ситуации и результатам; управленческое консультирование по проблеме. Фактор реализуется с помощью аналогий, ассоциаций и асимптотического приближения практически используемой «И» реально достижимой «И» потенциально возможной меры информации к необходимой. Математическая модель такого процесса базируется на применении теорем о вероятностях логически связанных событий в статике, Байеса, принципа Беллмана и метода динамического программирования в динамике условий XXI века.

В результате формируется теоретические основы системного математического моделирования ИБ ОЗ как аргумента его устойчивого развития в условиях XXI века.

## Литература

1. Доктрина информационной безопасности Российской Федерации: утв. Президентом РФ 9 сентября 2000 г., № Пр-1895. URL: http://www.scrf.gov.ru/documents/6/5.html (дата обращения 30.01.2016).

2. Валдайцев С. В. Антикризисное управление на основе инноваций: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2001. – 232 с.

3. Саркисян С. А., Лисичкин В. А., Минаев Э. С., Каспин В. И., Пасенчник Г. С. Теория прогнозирования и принятия решений. – М.: Высшая школа, 1977. 351 с.

4. Воробьев О. Ю. Эвентология. – Красноярск: СФУ, 2007. 434 с.

5. Ефремов В. С. Стратегическое планирование в бизнес-системах. — М.: Финпресс, 2001. 240 с.

6. Бажин И. И. Информационные системы менеджмента. – М.: ГУ-ВШЕ, 2000. 688 с.

7. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. – М.: Мир, 1976. 167 с.

8. Мазур М. Качественная теория информации. – М.: Мир, 1974. 326 с.

9. Харкевич А. А. О ценности информации // Проблемы кибернетики. 1960. № 4. С. 53-57.

10. Скрыль С. В., Киселев В. В., Джоган В. К., Багаев М. А., Финько В. Н., Шимон Н. С., Хаустов С. Н., Мещеякова Т. В. Распознавание и оценка угроз информационной безопасности территориальным сегментам Интегрированной мультисервисной телекоммуникационной системы органов внутренних дел: теоретические и организационно-методические основы: монография. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2012. 134 с.

11. Жидко Е. А. Методология системного математического моделирования информационной безопасности // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 3 (22). URL: http://naukovedenie.ru/PDF/67TVN314.pdf (дата обращения 27.01.2016).

12. Жидко Е. А., Попова Л. Г. Методологические основы обеспечения информационной безопасности инновационных объектов // Информация и безопасность. 2012. Т. 15. № 3. С. 369-376.

13. Жидко Е. А. Методические основы системного моделирования информационной безопасности // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 3. URL: http://naukovedenie.ru/PDF/68TVN314.pdf (дата обращения 27.01.2016).

14. Жидко Е. А. Методология исследований информационной безопасности экологически опасных и экономически важных объектов: монография. — Воронеж: ВГАСУ, 2015. 180 с.

15. Сазонова С. А. Решение задач обнаружения утечек систем газоснабжения и обеспечение их безопасности на основе методов математической статистики // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2015. № 14. С. 51-55.

16. Сазонова С. А. Информационная система проверки двухальтернативной гипотезы при диагностике утечек и обеспечении

безопасности систем газоснабжения // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2015. № 14. С. 56-59.

17. Жидко Е. А. Методология формирования единого алгоритма исследований информационной безопасности // Вестник Воронежского института МВД России. 2015. № 1. С. 62-69.

18. Жидко Е. А. Научно-обоснованный подход к классификации угроз информационной безопасности // Информационные системы и технологии. 2015. № 1 (87). С. 132-139.

19. Жидко Е. А., Попова Л. Г. Логико-вероятностно-информационное моделирование информационной безопасности // Вестник Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. 2014. № 4. С. 136-140.

20. Жидко Е. А. Высокие интеллектуальные и информационные технологии интегрированного менеджмента XXI века: монография. Изд-во ВУНЦ ВВС ВВА имени профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина. Воронеж, 2013. 76 с.

21. Барковская С. В., Жидко Е. А., Попова Л. Г. Высокие интеллектуальные технологии интегрированного менеджмента XXI века // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 9. С. 28-32.

22. Жидко Е. А., Попова Л. Г. Информационная и интеллектуальная поддержка управления развитием социально-экономических систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2014. № 10 (93). С. 12-19.

23. Жидко Е. А. Методология формирования системы измерительных шкал и норм информационной безопасности объекта защиты // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 2 (97). С. 17-22.

24. Жидко Е. А., Кирьянов В. К. Формирование системы координат и измерительных шкал для оценки состояний безопасного и устойчивого развития хозяйствующих субъектов // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2014. № 1 (14). С. 60-68.

25. Гражданский кодекс РФ. (В редакции Федерального закона от 21 июля 2014 г. № 222-ФЗ). URL: http://1gkrf.ru (дата обращения 30.01.2016).

26. Жидко Е. А., Попова Л. Г. Концепция системного математического моделирования информационной безопасности // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 2 (21). URL: http://naukovedenie.ru/PDF/157EVN214.pdf (дата обращения 30.01.2016).

27. Жидко Е. А., Попова Л. Г. Принципы системного математического моделирования информационной безопасности // Интернет-журнал Науковедение. 2014. № 2 (21). URL: http://naukovedenie.ru/PDF/169EVN214.pdf (дата обращения 30.01.2016).

28. Сазонова С. А. Обеспечение безопасности функционирования систем газоснабжения при реализации алгоритма диагностики утечек без учета помех от стохастичности потребления // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2015. № 14. С. 60-64.

## References

1. *Doktrina informatsionnoi bezopasnosti Rossiiskoi Federatsii*: *utverzhdena Prezidentom RF 9 sentiabria 2000 g, № Pr-1895* [The Doctrine of Information Security of the Russian Federation: approved by The President of the Russian Federation on 9 September 2000. No. PR-1895]. Available at: http://www.scrf.gov.ru/documents/6/5.html (accessed 30 January 2016) (in Russian).

2. Valdaytsev S. V. *Antikrizisnoye upravleniye na osnove innovaciy.* [Anti-crisis management through innovation]. Saint-Petersburg, St. Petersburg. University Publ., 2001. 232 p. (in Russian).

3. Sarkisian S. A., Lisichkin V. A., Minaev E. S., Kaspin V. I., Pasenchnik G. S. *Teorija prognozirovanija i prinjatija resheniy*. [The Theory of Forecasting and Decision Making]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1977. 351 p. (in Russian).

4. Vorobyev O. Y. *Eventologija* [Eventology]. Krasnoyarsk, SibFU Publ., 2007. 434 p. (in Russian).

5. Efremov V. S. *Strategicheskoye planirovaniye v biznes-sistemah* [Strategic Planning in Business Systems]. Moscow, Finpress Publ., 2001. 240 p. (in Russian).

6. Bazhin I. I. *Informacionnyje sistemy menedgmenta* [Information Systems Management]. Moscow, Higher School of Economics – National Research University Publ., 2000. 688 p. (in Russian).

7. Zade L. A. *Ponjatiye lingvisticheskoy peremennoy i yego primeneniye k prinjatiju priblizhennyh resheniy* [The Concept of a Linguistic Variable and its Application to Approximate Reasoning]. Moscow, Mir Publ., 1976. 167 p. (in Russian).

8. Mazur M. *Kachestvennaja teorija informacii* [Qualitative Theory of Information]. Moscow, Mir Publ., 1974. 326 p. (in Russian).

9. Kharkevich A. A. About the value of information. *Problemy kibernetiki*, 1960, no. 4, pp. 53-57 (in Russian).

10. Skryl S. V., Kiselev V. V., Johan V., Bagaev M. A., Finko V. N., Shimon N. S., Khaustov S. N., Meshcheryakova T. V. *Raspoznavaniye i ocenka ugroz informatsionnoi bezopasnosti territorialnym segmentom integrirovannoy multiservesnoy telekommunikacionnoy sistemy organov vnutrennih del* [Recognition and Assessment of Information Security Threats to Territorial Segments of Integrated Multi-Service Telecommunication System of Internal Affairs of Russian Federation. Theoretical, organizational and methodological foundations]. Voronezh, Voronezh Institute of the Ministry of internal Affairs of Russia Publ., 2012. 134 p. (in Russian).

11. Zhidko E. A. The methodology of the system of mathematical modeling of information security. *Naukovedenie*, 2014, vol. 22, no. 3. Available at: http://naukovedenie.ru/PDF/67TVN314.pdf (accessed 27 January 2016) (in Russian).

12. Zhidko E. A., Popova L. G. Methodological foundations of information security innovation of information security. *Information and security*, 2012, vol. 15, no. 3, pp. 369-376 (in Russian).

13. Zhidko E. A. Methodological foundations of systems modeling of information security. *Naukovedenie*, 2014, vol. 22, no. 3. Available at: http://naukovedenie.ru/PDF/68TVN314.pdf (accessed 27 January 2016) (in Russian).

14. Zhidko E. A. *Metodologija issledovaniy informacionnoy bezopasnosti ecologicheski opasnyh i ekonomicheski vazhnyh obektov* [Methodology of Research of Information Security of Environmentally Hazardous and Economically Important Objects].Voronezh, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering Publ., 2015. 183 p (in Russian).

15. Sazonova S. A. The Solution of Problems of Leak Detection Systems Gas Supply and Security on the Basis of Methods of Mathematical Statistics. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*, 2015, no. 14, pp. 51-55 (in Russian).

16. Sazonova S. A. The Information System Checks Dualtime Alternative Hypotheses when Diagnosing Leaks and Providing Security of Gas Supply Systems. *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*, 2015, no. 14, pp. 56-59 (in Russian).

17. Zhidko E. A. The methodology of Forming a Single Algorithm Information Security Research. *Vestnik of Voronezh Institute of the Ministry of Interior of Russia*, 2015, no 1, pp. 62-69 (in Russian).

18. Zhidko E. A. Research-based Approach to the Classification of Threats to Information Security. *Information systems and technologies*, 2015, vol. 87, no. 1, pp. 132-139 (in .Russian).

19. Zhidko E. A., Popova L. G. Logical-and-Probabilistic-Informational Modeling of Information Security. *Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva*, 2014, no. 4, pp. 136-140 (in Russian).

20. Zhidko E. A. *Vysokiye intrllektualnyje I informacionnyje tehnologii integrirovannogo menedgmenta XXIveka* [High Intellectual and Information Technologies Integrated Management of XXI Century]. Voronezh, Voenno-vozdushnaia akademiia im. professora N. E. Zhukovskogo i Iu. A. Gagarina Publ., 2013. 76 p. (in Russian).

21. Barkovskaya S V., Zhidko E. A., Popova L. G. High intellectual technologies of integrated management of the XXI century. *The Bulletin of Voronezh State Technical University*, 2010, vol. 6, no. 9, pp. 28-32 (in Russia).

22. Zhidko E. A., Popova L. G. Information and Intellectual Support of Management of Development of Socio-Economic Systems. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2014, vol. 93, no 10, pp. 12-19 (in Russian).

23. Zhidko E. A. Formation Methodology for the System of Protected Object Measuring Scales and Information Security Standards. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*, 2015, vol.97, no. 2, pp. 17-22 (in Russian).

24. Zhidko E. A., Kiryanov V. K. Formirovanie sistemy koordinat i izmeritel'nykh shkal dlia otsenki sostoianii bezopasnogo i ustoichivogo razvitiia khoziaistvuiushchikh sub"ektov [The Formation of coordinate systems and measuring scales for the assessment of safe and sustainable development of economic entities]. *Engineering systems and constructions*, 2014, vol. 14, no. 1, pp. 60-68 (in Russian).

25. The Civil Code of the Russian Federation. (As Amended by Federal Law of July 21, 2014 No. 222-FZ). Available at: URL: http://1gkrf.ru (accessed 27 January 2016) (in Russian).

26. Zhidko E. A., Popova L. G. The Concept of Systematic Mathematical Modelling Information Security. *Naukovedenie,* 2014, vol. 21, no. 2. Available at: http://naukovedenie.ru/PDF/157EVN214.pdf (accessed 27 January 2016) (in Russian).

27. Zhidko E. A., Popova L. G. The principles of the system of mathematical modeling of information security. *Naukovedenie*, 2014, vol. 21, no. 2 Available at: URL: http://naukovedenie.ru/PDF/169EVN214.pdf (дата обращения 30.01.2016).

28. Sazonova S. A. The security of functioning of systems of gas supply during the implementation of the algorithm for the diagnosis of leakage without taking into account interference from the stochasticity of consumption . *Vestnik Voronezhskogo instituta vysokikh tekhnologii*, 2015, no. 14, pp. 60-64 (in Russian).

**Статья поступила 29 декабря 2015 г.**

## Информация об авторе

*Жидко Елена Александровна* – кандидат технических наук, доцент. Профессор кафедры пожарной и промышленной безопасности. Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. Область научных интересов: проблема обеспечения безопасного и устойчивого (антикризисного) развития хозяйствующих субъектов, как функции их конкурентоспособности. В качестве аргумента конкурентоспособности рассматривается экологическая и информационная безопасность этих субъектов. Тел.: +7 910 345 46 13. E-mail: lenag66@mail.ru

Адрес: 394006, Россия, г. Воронеж, ул.20-летия Октября, д.84.

---

# Logical-and-probabilistic-informational approach to the formation of a unified algorithm of research of information security protection

E. A. Zhidko

***Problem statement:*** *in the doctrine of information security of the Russian Federation have shown shortcomings in its provision at the present stage. One of them is: "the inconsistency and poor legal*

*regulation of social relations in the information sphere, which leads to serious negative consequences for the individual, society, state.* ***The aim of this*** *is the ability to create a single logical approach to the research of information security of the object of protection in the presence of threats of violations with unacceptable consequences.* ***Methods used:*** *the methodology of research on the problem form methods of attachment, analogies, associations and asymptotic approximations of the theoretical and effective linguistic, semantic, mathematical modeling methods, which are based on a combination of modeling methods by the formula Backus-Naur form.* ***Novelty:*** *the formation of a unified approach in terms of information security of object is based on syntactic, semantic and mathematical modeling of conventionally interconnected development of the external and internal environment of object theoretical event logical and empirical methods, coordinated by objective, place and time, the range of field conditions and problematic situations.* ***Result:*** *formed a theoretical approach to the system mathematical description of the concepts of information security.* ***Practical relevance*** *a unified approach to the logical description of concepts in the research of information security can reliably solve the technical problem of providing methods and means useful from the point of view of achieving the main goal - protection from threats of violation of information security of the object and sustained (anti-crisis) development in shaping and projected environment of the twenty-first century.*

***Keywords:*** *object protection, information security, methods and systems modeling.*

## Information about Author

*Elena Aleksandrovna Zhidko* – Ph.D. of Engineering Sciences, Associate Professor. Professor of the Department of Fire and Industrial Safety. Voronezh State University of Architecture and Construction. Field of research: the problem of providing safe and sustainable (anti-crisis) development of economic entities, as a function of their competitiveness. As the argument of the competitiveness of the ecological and information security of these subjects. Tel.: +7 910 345 46 13. E-mail: lenag66@mail.ru

Address: Russia, 394006, Voronezh, St. 20th anniversary of October, d. 84.

УДК 65.011.46

# Технико-экономический анализ целесообразности внедрения новых технологических решений

Макаренко С. И.

***Постановка задачи:*** *в настоящее время ведется постоянное технологические совершенствование технических систем. Вместе с тем в ряде случаев возникает задача определения экономической целесообразности внедрения новых технологических решений, полученных в результате выполнения диссертационных исследований или научно-исследовательских работ. Как правило в этом случае большинство авторов ограничивается сравнением технических систем по показателям их эффективности, без рассмотрения стоимости внедрения. Для научно-обоснованного решения вопроса о целесообразности внедрения новой технологии необходимо проведение технико-экономического анализа изменений в технической системе, а также экономической целесообразности проектирования, производства и эксплуатации новых технологических решений.* ***Целью работы*** *является разработка методики упрощенного технико-экономического анализа, позволяющего провести быструю оценку экономической целесообразности улучшения технологических характеристик модернизируемой технической системы по ограниченному набору параметров.* ***Новизна.*** *Элементом новизны представленной в работе методики технико-экономического анализа является совокупный упрощенный расчет целесообразности внедрения в техническую систему новых технологических решений по ограниченному числу параметров, которые, как правило, доступны исследователю. К числу таких параметров относятся: прирост эффективности системы в результате внедрения новых технологических решений, стоимость доработки аппаратно-программных средств системы, изменение стоимостных характеристик процесса ее эксплуатации.* ***Практическая значимость.*** *Методика технико-экономического анализа позволяет провести быструю упрощенную оценку экономической целесообразности внедрения новых технологических решений в технические системы на этапе их разработки. Данная методика будет полезна научным работникам и соискателям, ведущим научные и диссертационные исследования для экономического обоснования целесообразности предлагаемых ими улучшений технических систем.*

***Ключевые слова:*** *технико-экономический анализ, экономическая целесообразность, критерий «эффективность-стоимость».*

## Актуальность

При разработке новых технологических или научно-технических решений направленных на совершенствование технических систем (ТС), например, в результате диссертационных исследований или при выполнении НИОКР, в качестве критерия внедрения новой технологии используется рост эффективности производства или выполнения целевых задач ТС. При этом зачастую экономическая оценка такого решения представляется затратами на функционально-технические средства без проведения полномасштабного исследования вопроса экономической целесообразности внедрения новой технологии. Для научно-обоснованного решения вопроса о целесообразности внедрения новой технологии необходимо проведение технико-экономического анализа изменений в ТС и экономической целесообразности проектирования, производства и эксплуатации новых технологических решений. Технико-экономический анализ, также необходим и при определении эффективности новых технологических решений на этапах производства и эксплуатации ТС. Целью анализа является оценка экономической целесообразности улучшения

технологических характеристик модернизируемой ТС, а также выработка объективных требований к улучшению технических параметров при наименьших затратах.

Главным отличием технико-экономического анализа от экономической оценки является комплексный учет технических и стоимостных характеристик внедрения новых технологических решений [1, 2, 3].

## Методика технико-экономического анализа

Сущность анализа состоит в сравнении технико-экономических показателей проектируемой (внедряемой) ТС, разработанной на основе новых технологий и ее аналога. В качестве аналога может быть выбрана ТС, либо соответствующая по назначению проектируемой, либо та ТС, которая модернизируется за счет новых технологических решений.

В качестве показателя при технико-экономическом анализе используется показатель «эффективность-стоимость» Θ [2]:

$$\Theta = \frac{E}{C}, \tag{1}$$

где: $E$ – эффективность ТС; $C$ – стоимость экономических затрат на производство и эксплуатацию ТС.

Также при анализе используется показатель стоимости единицы эффективности – удельная стоимость эффективности η ТС, которая определяется как [2]:

$$\eta = \frac{1}{\Theta}, \tag{2}$$

откуда

$$\eta = \frac{C}{E}. \tag{3}$$

В общем случае критерием экономической целесообразности проектирования и внедрения новой технологии в ТС является [2]:

$$\Theta_2 - \Theta_1 \geq 0 \tag{4}$$

или

$$\eta_2 - \eta_1 \leq 0, \tag{5}$$

где: индекс 1 относится к ТС-аналогу, 2 – соответственно к ТС проектируемой с использованием новых технологических решений.

Оценка полной стоимости $C$ производства и эксплуатации ТС производится суммированием стоимости производства $C_{пр}$ и стоимости годовой эксплуатации $C_{эг}$ за срок службы ТС $T_{сл}$ [2]:

$$C = C_{пр} + C_{эг}\, T_{сл}. \tag{6}$$

При этом, стоимость производства ТС $C_{пр}$ рассчитывается исходя из стоимости покупных изделий для ТС $C_{ПИ}$, затрат на программное обеспечение для ТС $C_{ПО}$, а также доли капиталовложений на производство одной ТС $K$ [2]:

$$C_{пр} = C_{ПИ} + C_{ПО} + K. \tag{7}$$

Если ТС является сложной системой, то капиталовложения $K$ необходимо рассчитывать по составляющим.

Большая часть современных технологических решений связанна с модернизацией ТС за счет разработки нового программного обеспечения. Для таких элементов ТС доля капиталовложений либо равна нулю, либо не превышает 10 % [2]. Таким образом, при $K \approx 0$ выражение (7) примет вид:

$$C_{пр} = C_{ПИ} + C_{ПО}. \quad (8)$$

Стоимость покупных изделий ($C_{ПИ}$) из (7) рассчитывается как [2]:

$$C_{ПИ} = \sum_{i=1}^{J} \left( N_{изд\,i} C_{ПИ\,i} + C_{тр\,i} \right), \quad (9)$$

где: $N_{изд\,i}$ – количество изделий $i$-го типа для ТС; $C_{ПИ\,i}$ – цена одного изделия $i$-го типа для ТС; $C_{тр\,i}$ – транспортно-заготовительные расходы на производство изделия $i$-го типа для ТС; $J$ – количество типов покупных изделий для ТС.

Годовая стоимость эксплуатации ТС $C_{эг}$ из выражения (6) рассчитывается как [2]:

$$C_{эг} = C_{мг} + C_{обсл\,г} + C_{эн\,г} + C_{рг} + C_{аг} + C_{пр\,г}, \quad (10)$$

где: $C_{мг}$ – стоимость материалов, расходуемых в процессе эксплуатации ТС за год; $C_{обсл\,г}$ – расходы на обслуживающий персонал ТС за год; $C_{эн\,г}$ – расходы на энергию всех видов для ТС за год; $C_{рг}$ – стоимость ремонтов ТС за год; $C_{аг}$ – амортизационные отчисления за год; $C_{пр\,г}$ – прочие годовые расходы.

Свертка стоимостных показателей производства и эксплуатации ТС в показатель удельной стоимости эффективности представлена на рис. 1.

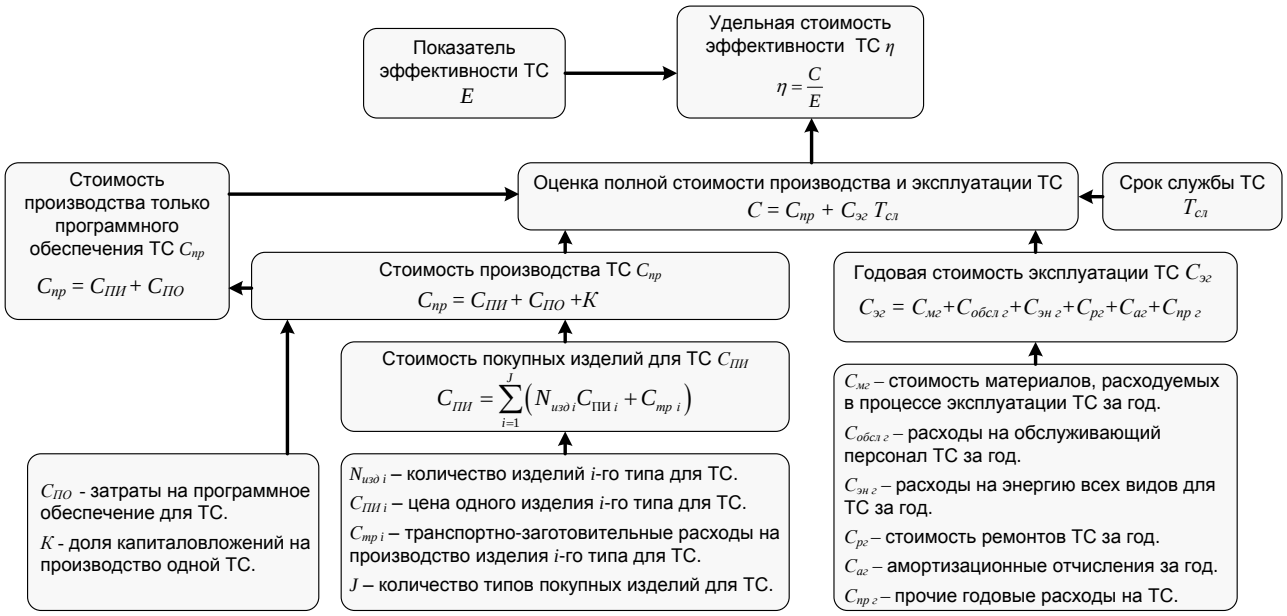



Рис. 1. Свертка стоимостных показателей производства и эксплуатации ТС в показатель удельной стоимости эффективности

С учетом выражений (6), (8), (9) и (10) удельная стоимость эффективности η, ранее определяемая выражением (3) примет вид:

$$\eta = \frac{1}{E}\left( C_{ПО} + \sum_{i=1}^{J} \left( N_{изд\,i} C_{ПИ\,i} + C_{тр\,i} \right) + \right.$$
$$\left. + T_{сл} \left( C_{мг} + C_{обсл\,г} + C_{эн\,г} + C_{рг} + C_{аг} + C_{пр\,г} \right) \right). \quad (11)$$

Пусть в результате внедрения новой технологии эффективность функционирования системы возросла в $k_E$ раз. При внедрении было затрачено:

- $C_{ПО\,нов}=(1+k_{ПО})C_{ПО}$ средств на новое программное обеспечение ТС (будем считать, что оно изменилось в $k_{ПО}$ раз по сравнению с существующем $C_{ПО}$);
- $C_{ПИ\,нов}=(1+k_{ПИ})C_{ПИ}$ средств на новое оборудование ТС (будем считать, что оно изменилось в $k_{ПИ}$ раз по сравнению с существующем $C_{ПИ}$).

Также в результате внедрения новых технологических решений изменились ежегодные затраты на эксплуатацию ТС:

- в $k_{мг}$ раз – на стоимость материалов, расходуемых в процессе эксплуатации ТС за год;
- в $k_{обсл\,г}$ раз – на расходы на обслуживающий персонал ТС за год;
- в $k_{эн\,г}$ раз – на расходы на энергию всех видов за год;
- в $k_{рг}$ раз – на стоимость ремонтов ТС за год;
- в $k_{аг}$ раз – на амортизационные отчисления за год;
- в $k_{пр\,г}$ раз – на прочие годовые расходы.

При этом срок службы ТС или соответствия системы заявленным требованиям в результате внедрения новых технологий увеличился в $k_{сл}$ раз.

В этом случае, удельная стоимость эффективности системы с внедренными новыми технологическими решениями ($\eta_2$) и аналога – ранее существующей ТС ($\eta_1$) составят:

$$\eta_1=\frac{1}{E}\left(C_{ПО}+C_{ПИ}+T_{сл}\left(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)\right), \tag{12}$$

$$\eta_2=\frac{1}{k_E\,E}\left(\left(1+k_{ПО}\right)C_{ПО}+\left(1+k_{ПИ}\right)C_{ПИ}+k_{сл}T_{сл}\times\right.$$
$$\left.\times\left(k_{мг}C_{мг}+k_{обсл\,г}C_{обсл\,г}+k_{эн\,г}C_{эн\,г}+k_{рг}C_{рг}+k_{аг}C_{аг}+k_{пр\,г}C_{пр\,г}\right)\right). \tag{13}$$

Для доказательства экономической целесообразности проектирования и внедрения новых технологических решений в ТС необходимо чтобы $\eta_1$ и $\eta_2$ соответствовали критерию (5). Разность $\eta_2-\eta_1$ с учетом выражений (6), (8-13) примет вид:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{1}{k_E E}\left(\left[1+k_{ПО}-k_E\right]C_{ПО}+\left[1+k_{ПИ}-k_E\right]C_{ПИ}+\right.$$
$$+T_{сл}\times\left[\left(k_{сл}k_{мг}-k_E\right)C_{мг}+\left(k_{сл}k_{облс\,г}-k_E\right)C_{обсл\,г}+\left(k_{сл}k_{эн\,г}-k_E\right)C_{эн\,г}+\right.$$
$$\left.\left.+\left(k_{сл}k_{рг}-k_E\right)C_{рг}+\left(k_{сл}k_{аг}-k_E\right)C_{аг}+\left(k_{сл}k_{пр\,г}-k_E\right)C_{пр\,г}\right]\right). \tag{14}$$

Для необходимости соответствия критерию экономической целесообразности (5) необходимо, чтобы $\eta_2-\eta_1\le 0$. Таким образом, окончательно критерий экономической целесообразности примет вид:

$$\left[1+k_{ПО}-k_E\right]C_{ПО}+\left[1+k_{ПИ}-k_E\right]C_{ПИ}+$$
$$+T_{сл}\left[\left(k_{сл}k_{мг}-k_E\right)C_{мг}+\left(k_{сл}k_{облс\,г}-k_E\right)C_{обсл\,г}+\left(k_{сл}k_{эн\,г}-k_E\right)C_{эн\,г}+\right.$$
$$\left.+\left(k_{сл}k_{рг}-k_E\right)C_{рг}+\left(k_{сл}k_{аг}-k_E\right)C_{аг}+\left(k_{сл}k_{пр\,г}-k_E\right)C_{пр\,г}\right]\le 0. \tag{15}$$

## Примеры использования технико-экономического анализа

Рассмотрим пример использования методики технико-экономического анализа для обоснования целесообразности внедрения новых технологических решений.

**Пример 1.** Рассмотрим ситуацию, когда в результате диссертационных исследований или выполнения научно-исследовательской работы были предложены новые технологические решения, которые на 50% увеличивают эффективность технической системы по целевому показателю, т.е. $k_E$=1,5. При этом внедрение новых технологических решений требует следующих затрат:

- полной переработки программного обеспечения системы ($k_{ПО}$=1);
- изменение аппаратной части системы на 20%, что приводит к увеличению стоимости покупных изделий на этапе проектирования с коэффициентом $k_{ПИ}$=0,2.

В результате внедрения новых технологических решений ежегодные затраты на эксплуатацию системы не изменились, т.е.:

$$k_{мг}= k_{обсл\,г}= k_{эн\,г}= k_{рг} = k_{аг}=k_{пр\,г}=1.$$

Срок службы системы или соответствия системы заявленным требованиям в результате внедрения новых технологий не изменился: $k_{сл}$=1.

Используя выражения (12) и (13) найдем критерий экономической целесообразности внедрения, определив разность $\eta_2-\eta_1$:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{1}{k_E\,E}\Big(\big(1+k_{ПО}\big)C_{ПО}+\big(1+k_{ПИ}\big)C_{ПИ}+k_{сл}T_{сл}\times$$
$$\times\big(k_{мг}C_{мг}+k_{обсл\,г}C_{обсл\,г}+k_{эн\,г}C_{эн\,г}+k_{рг}C_{рг}+k_{аг}C_{аг}+k_{пр\,г}C_{пр\,г}\big)\Big)-$$
$$-\frac{1}{E}\Big(C_{ПО}+C_{ПИ}+T_{сл}\big(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\big)\Big). \qquad (16)$$

Применяя к выражению (16) ограничения по затратам на эксплуатацию и сроку службы системы (которые не изменились и соответствующие коэффициенты равны 1) получим:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{\big(1+k_{ПО}\big)C_{ПО}+\big(1+k_{ПИ}\big)C_{ПИ}+T_{сл}\big(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\big)}{k_E\,E}-$$
$$-\frac{k_E\Big(C_{ПО}+C_{ПИ}+T_{сл}\big(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\big)\Big)}{k_E E},$$

откуда

$$\eta_2-\eta_1=\frac{\big(1+k_{ПО}-k_E\big)C_{ПО}+\big(1+k_{ПИ}-k_E\big)C_{ПИ}}{k_E\,E}+$$
$$+\frac{\big(1-k_E\big)T_{сл}\big(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\big)}{k_E\,E}.$$

Подставляя: $k_E$=1,5; $k_{ПО}$=1; $k_{ПИ}$=0,2 получим:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{0,5C_{ПО}-0,3C_{ПИ}-0,5T_{сл}\big(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\big)}{1,5E}. \qquad (17)$$

Экономическая целесообразность внедрения определяется выполнением критерия: $\eta_2 - \eta_1 \le 0$. С учетом этого из выражения (17) получим:

$$0,5C_{ПО} - 0,3C_{ПИ} - 0,5T_{сл}\left(C_{мг} + C_{обсл\,г} + C_{эн\,г} + C_{рг} + C_{аг} + C_{пр\,г}\right) < 0, \quad (18)$$

Таким образом, задача оценки экономической целесообразности внедрения новых технологический решений свелась к задаче оценки стоимости разработки системы и стоимости ее эксплуатации.

Проведем анализ выражения (18) с учетом следующих ограничений. Срок службы системы $T_{сл}$=10 лет. Стоимость разработки программного обеспечения системы составляет 5% от стоимости изготовления аппаратной части (т.е. $C_{ПО}$=0,05$C_{ПИ}$). А стоимость эксплуатации изделия не превышает 10% от стоимости ее изготовления:

$$C_{мг} + C_{обсл\,г} + C_{эн\,г} + C_{рг} + C_{аг} + C_{пр\,г} = 0,1\left(C_{ПО} + C_{ПИ}\right).$$

При данных ограничениях, выражение (18) примет вид:

$$0,5\left(0,05C_{ПИ}\right) - 0,3C_{ПИ} - 0,5\cdot 10\left(0,05C_{ПИ} + C_{ПИ}\right) < 0$$

откуда

$$0,025C_{ПИ} - 0,3C_{ПИ} - 5,25C_{ПИ} < 0,$$

$$-5,525C_{ПИ} < 0.$$

Последнее выражение верно при любом значении $C_{ПИ}$. Таким образом, можно сделать вывод об экономической целесообразности внедрения в систему предлагаемых новых технологических решений.

**Пример 2.** В результате выполнения научно-исследовательской работы были предложены новые технологические решения, которые в 2,5 раза увеличивают эффективность технической системы по целевому показателю (то есть повышают эффективность на 150%), т.е. $k_E$=2,5. При этом внедрение новых технологических решений требует следующих затрат:

- полной переработки программного обеспечения системы ($k_{ПО}$=1);
- изменение аппаратной части системы на 50%, что приводит к увеличению стоимости покупных изделий на этапе проектирования на коэффициент $k_{ПИ}$=0,5.

В результате внедрения новых технологических решений ежегодные затраты на эксплуатацию системы не изменились, т.е.:

$$k_{мг} = k_{обсл\,г} = k_{эн\,г} = k_{рг} = k_{аг} = k_{пр\,г} = 1.$$

Срок службы системы или соответствия системы заявленным требованиям в результате внедрения новых технологий не изменился: $k_{сл}$=1.

Используя выражения (12) и (13) найдем критерий экономической целесообразности внедрения, определив разность $\eta_2 - \eta_1$:

$$\eta_2 - \eta_1 = \frac{1}{k_E E}\Big(\left(1 + k_{ПО}\right)C_{ПО} + \left(1 + k_{ПИ}\right)C_{ПИ} + k_{сл}T_{сл} \times$$

$$\times\left(k_{мг}C_{мг} + k_{обсл\,г}C_{обсл\,г} + k_{эн\,г}C_{эн\,г} + k_{рг}C_{рг} + k_{аг}C_{аг} + k_{пр\,г}C_{пр\,г}\right)\Big) -$$

$$-\frac{1}{E}\left(C_{ПО} + C_{ПИ} + T_{сл}\left(C_{мг} + C_{обсл\,г} + C_{эн\,г} + C_{рг} + C_{аг} + C_{пр\,г}\right)\right). \quad (19)$$

Применяя к выражению (19) ограничения по затратам на эксплуатацию и по сроку службы системы (которые не изменились и соответствующие коэффициенты равны 1) получим:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{(1+k_{ПО})C_{ПО}+(1+k_{ПИ})C_{ПИ}+T_{сл}\left(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)}{k_E\,E}-$$

$$-\frac{k_E\left(C_{ПО}+C_{ПИ}+T_{сл}\left(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)\right)}{k_E E},$$

откуда

$$\eta_2-\eta_1=\frac{(1+k_{ПО}-k_E)C_{ПО}+(1+k_{ПИ}-k_E)C_{ПИ}}{k_E\,E}+$$

$$+\frac{(1-k_E)T_{сл}\left(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)}{k_E\,E}.$$

Подставляя: $k_E$=2,5; $k_{ПО}$=1; $k_{ПИ}$=0,5 получим:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{-0,5C_{ПО}-1C_{ПИ}-1,5T_{сл}\left(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)}{2,5E}. \qquad (20)$$

Экономическая целесообразность внедрения определяется выполнением критерия: $\eta_2-\eta_1\le 0$. С учетом того, что выражение (20) меньше нуля при любых значениях переменных, можно сделать вывод об экономической целесообразности внедрения в систему предлагаемых новых технологических решений.

**Пример 3.** В результате выполнения научно-исследовательской работы были предложены новые технологические решения, которые не изменяют эффективность технической системы (т.е. $k_E$=1), однако в результате автоматизации снижают расходы на обслуживающий персонал в 2 раза ($k_{обсл\,г}$=2). При этом внедрение новых технологических решений требует следующих затрат:

- полной переработки программного обеспечения системы ($k_{ПО}$=1);
- изменение аппаратной части системы на 50%, что приводит к увеличению стоимости покупных изделий на этапе проектирования на коэффициент $k_{ПИ}$=0,5.

В результате внедрения новых технологических решений другие ежегодные затраты на эксплуатацию системы не изменились, т.е.:

$$k_{мг}=k_{эн\,г}=k_{рг}=k_{аг}=k_{пр\,г}=1.$$

Срок службы системы или соответствия системы заявленным требованиям в результате внедрения новых технологий не изменился: $k_{сл}$=1.

Используя выражения (12) и (13) найдем критерий экономической целесообразности внедрения, определив разность $\eta_2-\eta_1$:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{1}{k_E\,E}\Big((1+k_{ПО})C_{ПО}+(1+k_{ПИ})C_{ПИ}+k_{сл}T_{сл}\times$$

$$\times\left(k_{мг}C_{мг}+k_{обсл\,г}C_{обсл\,г}+k_{эн\,г}C_{эн\,г}+k_{рг}C_{рг}+k_{аг}C_{аг}+k_{пр\,г}C_{пр\,г}\right)\Big)-$$

$$-\frac{1}{E}\left(C_{ПО}+C_{ПИ}+T_{сл}\left(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)\right). \qquad (21)$$

Применяя к выражению (19) ограничения по затратам на эксплуатацию и сроку службы системы (которые не изменились и соответствующие коэффициенты равны 1) получим:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{(1+k_{ПО})C_{ПО}+(1+k_{ПИ})C_{ПИ}+T_{сл}\left(C_{мг}+k_{обсл\,г}C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)}{E}-$$

$$-\frac{\left(C_{ПО}+C_{ПИ}+T_{сл}\left(C_{мг}+C_{обсл\,г}+C_{эн\,г}+C_{рг}+C_{аг}+C_{пр\,г}\right)\right)}{E},$$

откуда

$$\eta_2-\eta_1=\frac{k_{ПО}C_{ПО}+k_{ПИ}C_{ПИ}+T_{сл}\left(1-k_{обсл\,г}\right)C_{обсл\,г}}{E}.$$

Подставляя: $k_{обсл\,г}$=2; $k_{ПО}$=1; $k_{ПИ}$=0,5 получим:

$$\eta_2-\eta_1=\frac{C_{ПО}+0,5C_{ПИ}-2T_{сл}C_{обсл\,г}}{E}. \quad (22)$$

Экономическая целесообразность внедрения определяется выполнением критерия: $\eta_2-\eta_1\le 0$. С учетом этого, из выражения (22) получим:

$$C_{ПО}+0,5C_{ПИ}-2T_{сл}C_{обсл\,г}<0, \quad (23)$$

Таким образом, задача оценки экономической целесообразности внедрения новых технологический решений свелась к задаче оценки стоимости разработки системы и стоимости ее эксплуатации.

Проведем анализ выражения (23) с учетом следующих ограничений. Срок службы системы $T_{сл}$=10 лет. Стоимость разработки программного обеспечения системы составляет 5% от стоимости изготовления аппаратной части (т.е. $C_{ПО}$=0,05$C_{ПИ}$).

При данных ограничениях, выражение (18) примет вид:

$$0,05C_{ПИ}+0,5C_{ПИ}-2\cdot 10C_{обсл\,г}<0$$

откуда

$$0,0275C_{ПИ}<C_{обсл\,г}.$$

Последнее выражение определяет граничные условия зависимости $C_{обсл\,г}$ от $C_{ПИ}$ для экономической целесообразности внедрения предлагаемых новых технологических решений в существующую техническую систему.

## Вывод

Представленная в работе методика технико-экономического анализа позволяет провести упрощенный расчет целесообразности внедрения в техническую систему новых технологических решений по ограниченному числу параметров, которые, как правило, доступны исследователю. К числу таких параметров относятся: прирост эффективности системы в результате внедрения новых технологических решений, стоимость доработки аппаратно-программных средств системы, изменение стоимостных характеристик процесса ее эксплуатации. Данная методика будет полезна научным работникам и соискателям, ведущим научные и диссертационные исследования, для экономического обоснования целесообразности предлагаемых ими улучшений технических систем.

## Литература

1. Панфлов И. В., Половко А. М. Вычислительные системы / Под ред. А.М. Половко. – М.: Сов. радио, 1980.

2. Основы надежности и технического обеспечения радиоэлектронных средств РТВ ПВО: учебник / Под ред. Б. П. Креденцера, В. Г. Тоценко. – К.: КВИРТУ ПВО, 1982. – 225 с.

3. Иванов Ю. В. Метод технико-экономической оценки эффективности техпроцессов и структур роботизированных комплексов сборки электронных изделий в многономенклатурном производстве // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Серия «Приборостроение». 2015. № 2. С. 58-70.

## References

1. Panflov I. V., Polovko A. M. Vychislitel'nye sistemy [Computing system]. Moscow, Sov. Radio Publ, 1980. (in Russian).

2. Kredentser B. P., Totsenko V. G. Osnovy nadezhnosti i tekhnicheskogo obespecheniia radioelektronnykh sredstv RTV PVO [The basics of reliability and technical maintenance of radio-electronic equipment radio engineering troops of air defense]. Kiev, Kiev Higher Engineering Radiotechnical School of Air Defense, 1982. 225 p. (in Russian).

3. Ivanov Yu. Technical and economic assessment method for the effectiveness of technological processes and robotic complexes structures for electronic modules assemblage within multinomenclature production. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series Instrument Engineering*, 2015, no. 2, pp. 58-70 (in Russian).

**Статья поступила 01 марта 2016 г.**

## Информация об авторе

*Макаренко Сергей Иванович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры сетей и систем связи космических комплексов. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: устойчивость сетей и систем связи к преднамеренным деструктивным воздействиям; радиоэлектронная борьба; информационное противоборство. E-mail: mak-serg@yandex.ru

Адрес: Россия, 197198, г. Санкт-Петербург, ул. Ждановская д. 13.

---

# Technical and Economic Assessment for New Technologies which Realize at Technical Systems

S. I. Makarenko

***Statement of the problem.*** *Technological improvement of technical systems is constantly happening now. The task of determining the economic expedience of introducing new technological solutions, which are*

*obtained as a result of the implementation of dissertation research or scientific research occurs in some cases. Changes in the technical system require a analysis experience. The economic expedience of the design, production and exploitation of new technological solutions should be conducted for evidence-based introduction of new technology.* ***The aim of this paper*** *is to develop method of simplified feasibility analysis. This method will allow make a simplified assessment of the economic viability of improving the technological characteristics of the upgraded technical systems, on a limited set of parameters.* ***Novelty.*** *The indicator of the feasibility expedience of new technological solutions within method based on limited number of parameters and this is the element of novelty. These parameters include – the grow efficiency of the system as a result of introduction of new technological solutions; the cost of upgrade of hardware and software systems; changing cost characteristics of the process of its operation.* ***Practical relevance.*** *Method of feasibility analysis to allow for rapid and simplified evaluation of the economic expedience of introducing new technological solutions in the technical systems at the stage of their development. This technique will be useful for researchers for conducting economic assessment of the feasibility of their proposed improvements of technical systems.*

***Key words:*** *feasibility analysis, economic expedience, criterion "efficiency-cost".*

## Information about Author

*Sergey Ivanovich Makarenko* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent. Associate Professor at the Department of Networks and Communication Systems of Space Systems. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: stability of network against the purposeful destabilizing factors; electronic warfare; information struggle. E–mail: mak-serg@yandex.ru

Address: Russia, 197198, Saint-Petersburg, Zjdanovskaya ulica, 13.

УДК 004.932

# Sharpening of Video Frames for Improvement of Feature Points Detection

S. A. Turko, I. V. Safonov

*Some visual tracking tasks are unable to operate stable for video with blurred frames because feature points detection is degraded on blur images. In the paper we concentrate on blurriness due to refocusing of camera optical system of mobile devices. Our aim is evaluation of influence of blur and sharpening on Harris corner and FAST keypoints detectors. We propose a quality criterion in order to be able to make numerical assessment of the influence. For enhancement of blurred frames we investigate two sharpening filters: local tone mapping decreases of edge transition slope length, unsharp mask via bilateral filter increases local contrast along edges. On data from KITTI Vision Benchmark Suite as well as video captured by smartphone we demonstrate that sharpening improves feature points detection for both Harris corner and FAST methods. A positive impact for FAST is significant, it may improve robustness of various computer vision systems.*

***Key words:*** *sharpening, FAST keypoints, Harris corner, local tone mapping, unsharp mask.*

## Introduction

One of the base problems of modern computer vision is a visual tracking. In particular, visual SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) and odometry apply tracking of landmarks (or feature points) for pose detection [1]. Systems based on visual monocular or stereo SLAM are intended for robotics, augmented reality and navigation. However, current realizations of such systems lack the robustness needed to be useful in real life outside laboratory conditions. A tracking relies on a prior landmarks over a current video frame. Feature points have to be detected, matched and tracked frame-to-frame. The loss of a large number of tracks on successive frames leads to fail of a camera pose estimation and map creation, some computer vision applications are able to survive after break in tracking, but for visual SLAM and odometry it can be fatally.

There are a lot of causes which prevent keypoints detection and interrupt tracking, among them are sharp brightness alteration, motion blur due to rapid camera motion as well as movement of foreground or background regions, out-of-focus due to autofocusing/refocusing of optical system, handshaking, etc. A reducing of impact of such defects on video is actual problem in order to do visual SLAM applications more stable. Among mentioned above deformities, overcoming of motion blur is discussed in publications mainly. In the paper we concentrate on enhancement of video that comprises of sequences of frames affected by blur due to refocusing of camera optical unit. That case is typical when smartphone is used for indoor navigation by means of visual SLAM or odometry. Periodically depending on scene camera of smartphone tries to adjust focus, and it leads to blurring of several successive frames. Usually majority of tracks are interrupted on the blurred frames.

The aim of our study is to try to find answers on the following issues:

- How does blurriness affect on feature point detection and tracking?
- Is it possible to improve feature point detection on blurred video via detector parameters adjustment?

- Which is detector more robust for keypoints detection on blurred image?
- Is able a sharpening technique improve feature points detection?
- Which is a sharpening method perform better for that task?

Nowadays there are a lot of algorithms for calculation of feature points and local descriptors of images. Nonetheless, mobile and embedded systems require techniques which are capable to provide low power consumption, it is connected directly with low computational complexity. In practical application computationally inexpensive Harris corner detector and FAST method are used frequently rather more complex algorithms, such as SIFT, SURF, MSER, etc. Moreover, paper [2] demonstrates for visual SLAM task: in general Harris detector performs comparable or better to other interest point detectors and descriptors. In the paper we examine an influence of blurriness on Harris corner detector [3] and FAST technique [4] as well as propose an approach for improvement of detection of feature points by means of a sharpening of video frames. Figure 1 illustrates our concept.

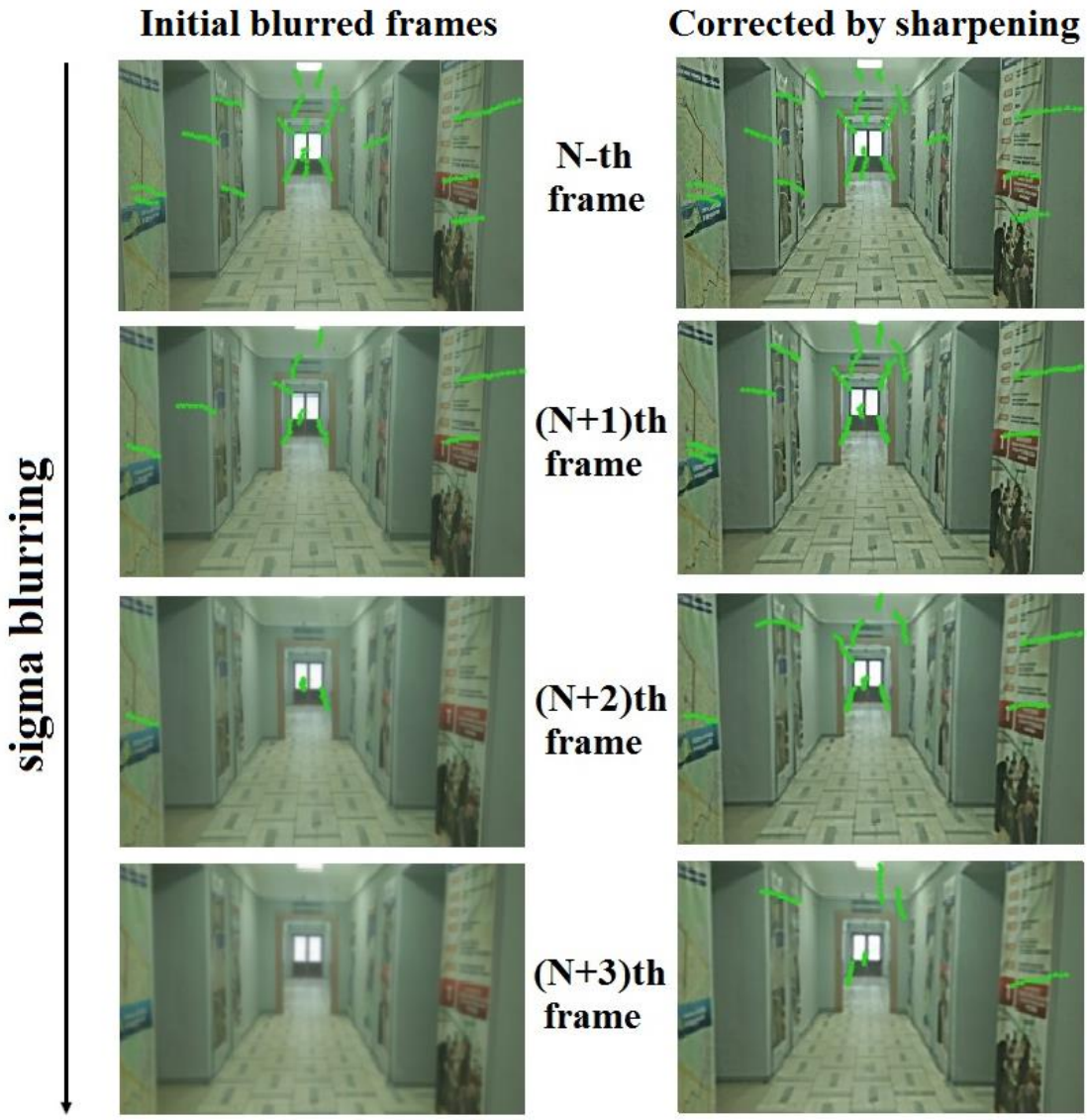



Figure 1. Sharpening of blurred frames improves tracking of landmarks

## Related works

In the best of our knowledge, we do not familiar with publications devoted to issues connected with feature point detection on blurred frames due to refocusing of camera optics. Some relation to considering problem has studies which invent interest point detectors which are invariant to blurring. However such detectors have a high computational complexity, for instance, paper [5] describes detector based on Gabor multi-scale space.

The fact that number of detected features degrades with growing of blurriness may be used for construction of non-reference sharpness metric. Paper [6] poses a blind blurriness assessment comprising of the following stages: extraction Harris corner feature points from the blurred image and re-blurred image, then the two feature point maps are divided into blocks to generate block-wise maps and are combined to the feature point quantity similarity map, finally, an overall blurriness estimation is calculated by pooling of the similarity and visual saliency maps. The general idea of such approach is close to non-reference metric proposed by Crete [7], it is interesting to compare those two evaluation techniques. In any case, both methods allow to estimate sharpness of video frame.

As it is mentioned above, majority of existing publications are considering a performing of visual SLAM in a presence of motion blur. In [8] camera motion and 3D map are reconstructed by SLAM based on a few number of landmarks, and the information makes the estimation of motion blur. The blurred images are recovered by Lucy-Richardson deconvolution, and additional feature points are extracted from the restored image in order to repeat SLAM with a greater number of keypoints. So, SLAM and motion deblurring help each other. The approach has hard limitation: at least several landmarks have to be tracked for motion estimation. More practical way is a usage of inertial sensors for measuring of camera movement as it is suggested in [9]. A good camera movement estimation allows deblurring of frames affected by motion blur, but in the case of out of focus frames due to camera refocusing the approach does not work, it is necessary to obtain information directly from optical unit in order to do possible performing of deblurring.

It is worth mention dense tracking approach that becomes more and more popular nowadays. Paper [10] suggests to match regions by blurring of sharp image instead of deblurring of blur image and matching of sparse feature points. Method from the paper is intended for video with motion blur. Actually, it is good way for matching in the case of a lot of various video deformations, if you do not pay attention to a huge computational complexity. Nevertheless, an applicability of such approach for frames smoothed by Gaussian blur is questionable.

## Figure of merit

We need in a figure of merit (or a quality criterion) in order to be able to estimate numerically influence of blurring and sharpening on feature point detection, matching and tracking. First of all, we selected several video files which do not contain blurred frames. For our experiments we borrowed fragments of two outdoor video from the KITTI Vision Benchmark Suite [11]. The dataset is intended for a lot of computer vision problems including visual odometry. The two test patterns are

designated below as Video 1 and Video 2. Video 3 was captured by smartphone Samsung Galaxy S5. The video simulates an indoor navigation. Figure 1 shows several frames of Video 3. Each test pattern has duration about 10 s.

Next, we captured dozens of real HD video by cameras of various smartphones and searched frames which are blurred due to refocusing of optical system. The investigation of such frames revealed: a typical refocusing durations are less 1 s; smoothing of each separate frame can be modeled by a Gaussian blur; a variance of Gaussian blur grows almost linearly up to 7, after that it falls to 0. Based on those facts we distort our test video files as a sequence of refocusing procedures. Figure 2 illustrates our modelling of a given type of blur. *Ti* and variance of each refocusing chunk vary in the ranges [0.5, 1] s and [5, 7] correspondingly.

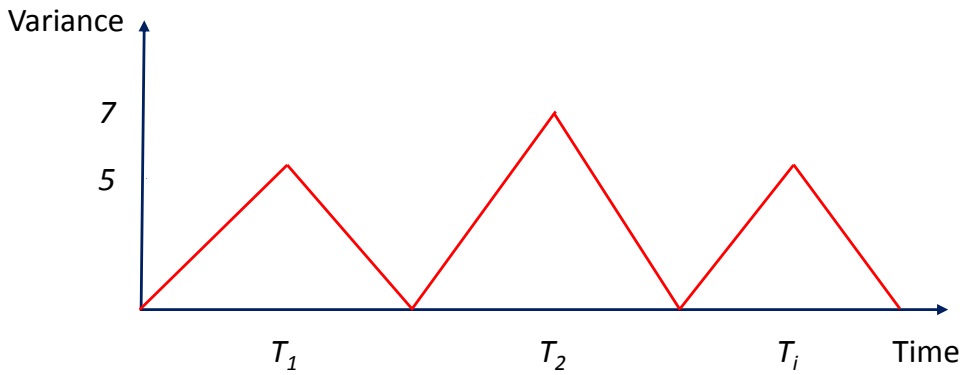



Figure 2. Refocusing simulation for video frames

Long tacks are preferable for visual SLAM and odometry, we take into account tracks with length greater than 10 that is tracks which we are able to track during 10 frames in sequence. For matching of interest points in adjacent frames Sum of Absolute Differences (SAD) of blocks 13x13 is used. We calculate tracks for initial good quality video and check presence the same tracks (or their long pieces) on distorted video. It is possible to have a small offset between corresponding key points when we compare tracks of initial and blurred video frames. We propose figure of merit as ratio of cumulative sum of lengths of long tracks of blurred video to cumulative sum of lengths of long tracks of initial video, whereas tracks on distorted video have to correspond to tracks on initial one:

$$Q = \frac{\sum_k P_k}{\sum_i E_i} \times 100\%, \tag{1}$$

where $P_k$ is length of $k^{th}$ track of processed pattern, *Ei* is length of $i^{th}$ track of initial video.

For unprocessed or completely restored video Q=100%, for fatally distorted frames *Q*=0%. One can argue with proposed criterion, because it does not take into account new tracks which absence on initial frames and appear on processed ones. Theoretically it is true statement. However in practice a number of such new tracks is negligibly small. In general, proposed figure of merit coincides with our subjective assessments.

## Feature points detection on blurred video

We estimated how that type of blur acts on detection of Harris corner and FAST keypoints. As we expected, a few number of interest points can be detected only. Tables below demonstrates that it is impossible to adjust of detectors thresholds $T_H$ and $T_F$ for Harris and FAST detectors accordingly in order to improve detection capability. Harris corner detector is a little bit more robust to blur than FAST. About 10% of tracks are survived for Harris corner detector that corresponds to about two dozen of tracks per video. Is it enough for visual SLAM/odometry? We have doubt. In the next chapters we try to improve situation by means of sharpening filters.

Table 1 – Figure of merit *Q* for Harris detector on blurred video

| $T_H$ | Video 1 | Video 2 | Video 3 |
|---|---|---|---|
| 0.05 | 6,47 | 9,76 | 15,78 |
| 0.08 | 5,22 | 8,64 | 14,20 |
| 0.11 | 5,12 | 7,86 | 15,38 |
| 0.14 | 4,89 | 7,90 | 13,20 |
| 0.17 | 6,54 | 8,79 | 12,67 |
| 0.2 | 5,68 | 7,94 | 12,87 |

Table 2 – Figure of merit *Q* for FAST detector on blurred video

| $T_F$ | Video 1 | Video 2 | Video 3 |
|---|---|---|---|
| 35 | 1,75 | 5,29 | 5,29 |
| 45 | 0,89 | 2,60 | 3,69 |
| 55 | 0,56 | 1,17 | 2,89 |
| 65 | 2,09 | 0,36 | 1,06 |
| 75 | 0 | 0,14 | 0,32 |
| 85 | 0 | 0 | 0 |

## Sharpening algorithm

In spite of big advances of image restoration techniques, deconvolution algorithms are too slow for real-time video processing. Methods of image enhancements are more practical. Paper [12] proposes joint application of two image enhancement filters:

- Unsharp Mask (UM) via bilateral filter increases local contrast on the ends of edge transition slope;
- Local Tone Mapping (LTM) with an ordering decreases edge transition slope length.

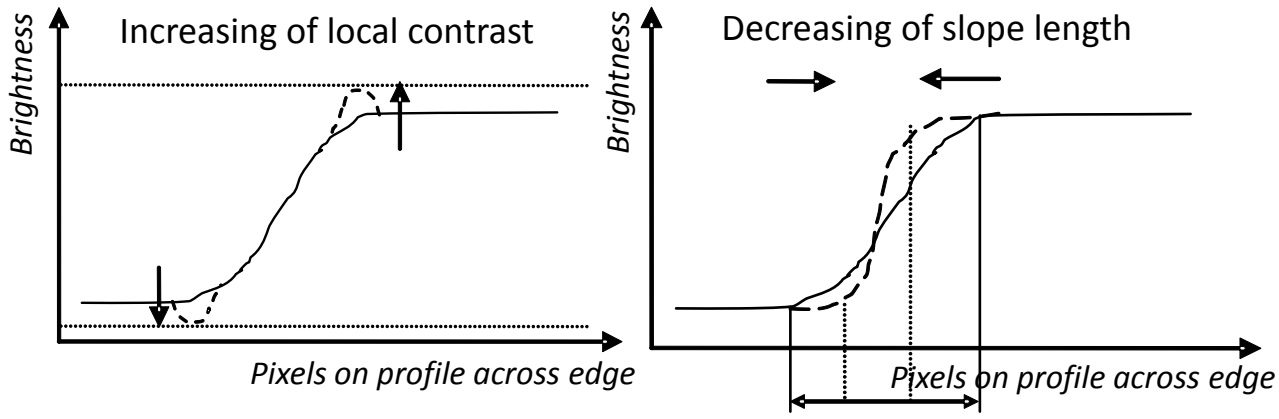



Figure 3. Illustration of UM and LTM filters
on brightness profile across blurred edge.

We adopted those two filters for sharpening of video. At first, an ordering in [12] is intended for processing of noisy images. Video for visual SLAM has a low noise level. Thus, we can drop an ordering, it give a positive impact on processing speed. At second, we add modification of color channels that follows after sharpening of brightness image. Brightness channel is calculated as:

$$Y(x,y) = MAX(R(x,y), G(x,y), B(x,y)), \tag{2}$$

where *(x,y)* is pixel coordinate, *R*, *G* and *B* are color channels of an image.

In LTM filter a square sliding window moves throughout a frame, and each pixel of *Y* is transformed by means of locally adaptive S-shaped curve:

$$Y_{LTM}(x,y) = \begin{cases} Y(x,y) : H(x,y) - L(x,y) \le T_{LTM} \\ L(x,y) + \dfrac{a(x,y)^2 \times (H(x,y) - L(x,y))}{a(x,y)^2 + (1 - a(x,y))^2} : otherwise \end{cases}, \tag{3}$$

where $a(x,y) = \dfrac{Y(x,y) - L(x,y)}{H(x,y) - L(x,y)}$, *L(x,y)* is minimal from *Y(x,y)* in local window [$x - R_{LTM}$, $y - R_{LTM}$, $x + R_{LTM}$, $y + R_{LTM}$], *H(x,y)* is maximal form *Y(x,y)*, $T_{LTM}$ is threshold for preventing processing of flat regions.

Unsharp mask is one of the most popular sharpening filter. The filter improves visual perception of an image by addition of combs along edges. However, the filter has several drawbacks: halo-artifacts forming, height of the combs depends on edge magnitude. UM via bilateral filter is free from those disadvantages. We use the following filter:

$$Y_{UM}(x,y)=\begin{cases} Y(x,y)+k(Y(x.y)-Y_{BF}(x,y)) : \left|Y(x,y)-Y_{BF}(x,y)\right| \geq T_{UM} \\ Y(x,y)+\dfrac{k(Y(x,y)-Y_{BF}(x,y))}{2} : otherwise \end{cases}, \tag{4}$$

where $Y_{BF}$ is filtered $Y$ by bilateral filter, $k$ is amplification factor, $T_{UM}$ is threshold for preventing of noise level growing.

In contrast to a classical bilateral filter [13], that uses Gaussians as spatial kernel and photometric distance (or edge-stop function), we propose application of flat spatial kernel and edge-stop function, that on the one hand is similar to Gaussian and on the other hand does not tend to zero so rapidly. The filter blurs edges stronger in comparison with classical bilateral filter and weaker than a Gaussian smoothing. It prevent forming of halo-artifact that is typical for a conventional unsharp mask technique.

Our modification of a bilateral filter is calculated according to the following formulae:

$$Y_{BF}(x,y)=\frac{\sum_{i=-S/2}^{S/2}\sum_{j=-S/2}^{S/2}Y(x+i,y+j)D(Y(x+i,y+j)-Y(x,y))}{S^2\sum_{i=-S/2}^{S/2}\sum_{j=-S/2}^{S/2}D(Y(x+i,y+j)-Y(x,y))}, \tag{5}$$

where $S$ is size of spatial kernel (or sliding window), $D$ is photometric distance, that is calculated as:

$$D(z)=\frac{1}{\sqrt{1+\left|\dfrac{z}{1.5S^2}\right|^3}}. \tag{6}$$

LTM and UM filters can be used independently from each other. However joint application of both filters is capable provide a better outcomes. It is preferable to apply LTM before UM.

Finally, we need to make conversion of gray channel processed by sharpening filters to color image, because matching of feature points is carried out for color frames. Paper [14] poses a simple approach that preserves ratios between RGB channels with each other, accordingly the following expressions do not change hue and saturation of the processed color image in comparison with initial one:

$$R_e(x,y)=R(x,y)Y_e(x,y)/Y(x,y), \tag{7}$$

$$G_e(x,y)=G(x,y)Y_e(x,y)/Y(x,y), \tag{8}$$

$$B_e(x,y)=B(x,y)Y_e(x,y)/Y(x,y), \tag{9}$$

where $Y_e$ is $Y$ processed by sharpening filters.

Figure 4 shows example of consistent application of LTM and UM filters. One can see, edges become a sharper, processed frame has no annoying artifacts.

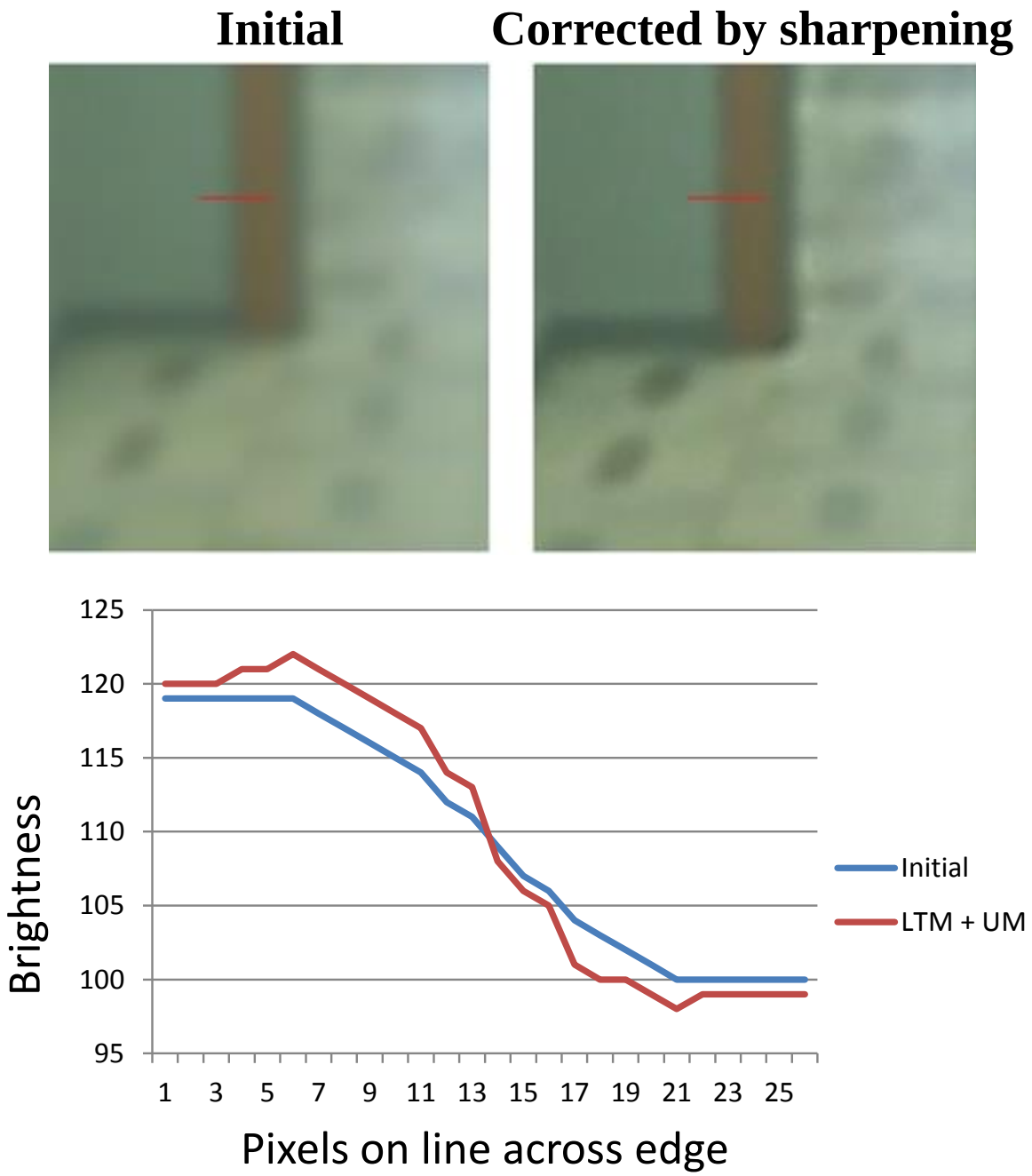



Figure 4. Example of sharpening by LTM+UM

## Results

We processed our three blurred patterns by LTM, UM and combination (LTM+UM) of this filters with the following parameters: $R_{LTM}$ =15, $T_{LTM}$=7, $S$=22, $k$=105 and $T_{UM}$ =7. Such parameters ensure good visual quality of corrected video. Table below contains obtained outcomes for Harris corner and FAST detectors. For Harris corner detector an impact of LTM and UM is approximately equal. For FAST detector an impact of UM filter is in several times more in comparison with LTM. In both cases combination of LTM and UM filters provides a better results in comparison with outcomes of each separate filter.

Table 3 – Criterion *Q* for keypoints detectors on improved video

| | Harris corner | | | FAST | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | LTM | UM | LTM+ UM | LTM | UM | LTM+ UM |
| Video 1 | 8,04 | 8,52 | 13,25 | 6,45 | 18,89 | 21,76 |
| Video 2 | 11,30 | 8,08 | 12,89 | 5,45 | 17,30 | 28,56 |
| Video 3 | 14,72 | 13,96 | 17,75 | 1,99 | 12,65 | 23,20 |

It is important to compare *Q* for blurred and sharpened video. Diagram on figure 5 allows doing that. In general, we can conclude: sharpening is unable to improve blurred video for Harris detector significantly; contrary, sharpening can improve detection ability of FAST detector in several times. Application of sharpening restores about 25% long tracks. In absolute numbers it corresponds to hundreds of tracks per 10 s of video. We ask ourselves again: is it enough for visual SLAM/odometry? It is hard to answer surely, but it should work in the most cases, although, it is not guarantee an appropriate improvement always.

## Discussion and Future work

Our study demonstrates that sharpening is able to improve FAST feature points detection for blurred video due to refocusing of camera optical system. Of course, sharpening is a palliative solution that is unable to restore strongly blurred images. Nevertheless we encourage application of sharpening as preprocessing stage in visual SLAM and odometry tasks, where a break in tracking leads to inconsistency of algorithms often.

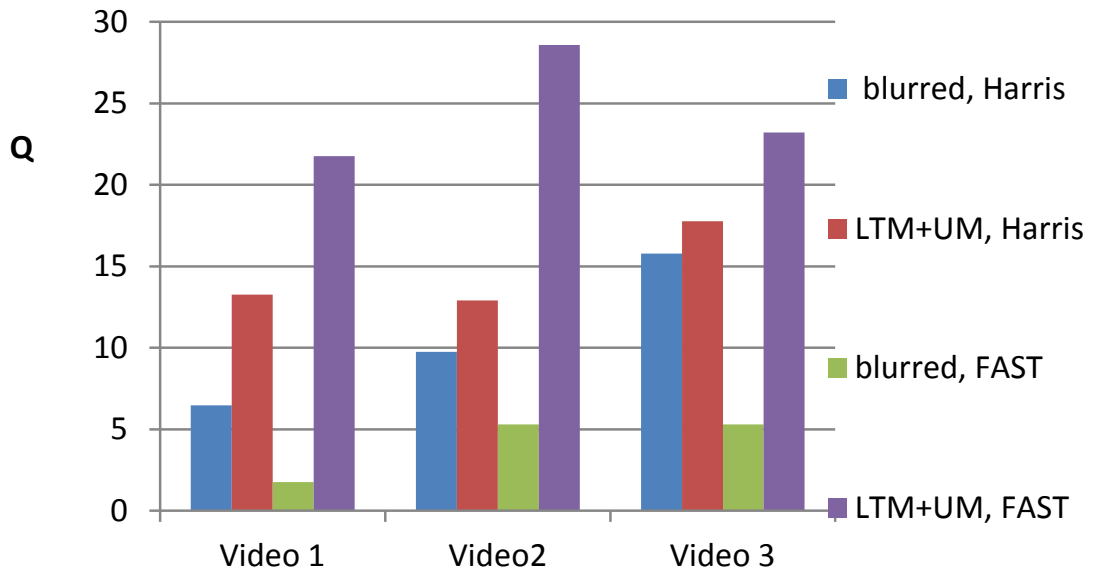



Figure 5. Impact of blur and sharpening on feature detection

Additional research is necessary for various sharpening algorithms as well as different feature points and descriptors. In particular, we revealed that increasing of amplification factor *k* of UM filter leads to growing of *Q* for both analyzed feature points algorithms, but video becomes to be unpleasant visually. Other topical problem is reduction of influence on feature points detection other types of blurriness including motion blur. According to our preliminary experiments, sharpening a little bit helps in the case of motion blur too. However, a deeper research is necessary. In the future we are going to investigate much more test video files for various types of blur as well as several sharpening techniques including adaptive approaches, where filter parameters are adjusted depending on blurriness of image. Also, an actual research subject is development of novel blind sharpness metrics based on feature points.

## References

1. Munguia R., Gra A. Monocular SLAM for visual odometry. *Proc. of IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP 2007)*, 2007, pp. 1-6.

2. Gil A., Mozos O. M., Ballesta M., Reinoso O. A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM. *Machine Vision and Applications*, 2010, vol. 21, no. 6, pp. 905-920.

3. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector. *Proc. of Alvey vision conference*¸ 1988, vol. 15, p. 50.

4. Rosten E., Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection. *Proc. of Computer Vision conf. (ECCV 2006)*, 2006, pp. 430-443.

5. Xie J., Cai Z. An effective blur invariant interest point detector. *Proc. of IEEE International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV 2013)*, 2013, pp. 281-284.

6. Cai H., Li L., Qian J., Pan J. S. Image Blur Assessment with Feature Points. *Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing*, 2015, vol. 6, no. 3, pp. 482-490.

7. Crete F., Dolmiere T., Ladret P., Nicolas M. The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric. *Proc. of Electronic Imaging*, 2007, pp. 64920I-64920I-11.

8. Lee H. S., Kwon J., Lee K. M. Simultaneous localization, mapping and deblurring. *Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2011)*, 2011, pp. 1203-1210.

9. Klein G. S., Drummond T. W. Tightly integrated sensor fusion for robust visual tracking. *Image and Vision Computing*, 2004, vol. 22, no. 10, pp.769-776.

10. Jin H., Favaro P., Cipolla R. Visual tracking in the presence of motion blur. *Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition conf. (CVPR 2005)*, 2005, vol. 2, pp. 18-25.

11. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? The kitti vision benchmark suite. *Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition conf. (CVPR 2012)*, 2012, pp. 3354-3361.

12. Safonov I. V., Rychagov M. N., Kang K. M., Kim S. H. Adaptive sharpening of photos. *Proc. of Electronic Imaging*, 2008, pp. 68070U-68070U-12.

13. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images. *Proc. of IEEE International Conference on Computer Vision*, 1998, pp. 839-846.

14. Safonov I. V., Automatic correction of amateur photos damaged by backlighting. *Proc. of International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2006)*, 2006, pp. 80-89.

## Литература

1. Munguia R., Gra A. Monocular SLAM for visual odometry // IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP 2007). 2007. С. 1-6.

2. Gil A., Mozos O. M., Ballesta M., Reinoso O. A comparative evaluation of interest point detectors and local descriptors for visual SLAM // Machine Vision and Applications. 2010. Т. 21. № 6. С. 905-920.

3. Harris C., Stephens M. A combined corner and edge detector // Alvey vision conference. 1988. Т. 15. – С. 50.

4. Rosten E., Drummond T. Machine learning for high-speed corner detection // Computer Vision conf. (ECCV 2006). 2006. С. 430-443.

5. Xie J., Cai Z. An effective blur invariant interest point detector // IEEE International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV 2013). 2013. С. 281-284.

6. Cai H., Li L., Qian J., Pan J. S. Image Blur Assessment with Feature Points // Journal of Information Hiding and Multimedia Signal Processing. – 2015. Т. 6. № 3. С. 482-490.

7. Crete F., Dolmire T., Ladret P., Nicolas M. The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric // Electronic Imaging. 2007. С. 64920I-64920I-11.

8. Lee H. S., Kwon J., Lee K. M. Simultaneous localization, mapping and deblurring // IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV 2011). 2011. С. 1203-1210.

9. Klein G. S., Drummond T. W. Tightly integrated sensor fusion for robust visual tracking // Image and Vision Computing. - 2004. Т. 22. № 10. С. 769-776.

10. Jin H., Favaro P., Cipolla R. Visual tracking in the presence of motion blur // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2005). 2005. Т. 2. С. 18-25.

11. Geiger A., Lenz P., Urtasun R. Are we ready for autonomous driving? The kitti vision benchmark suite // IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2012). 2012. С. 3354-3361.

12. Safonov I. V., Rychagov M. N., Kang K. M., Kim S. H. Adaptive sharpening of photos // Electronic Imaging. 2008. С. 68070U-68070U-12.

13. Tomasi C., Manduchi R. Bilateral filtering for gray and color images // IEEE International Conference on Computer Vision. 1998. – С. 839-846.

14. Safonov I. V. Automatic correction of amateur photos damaged by backlighting // International Conference on Computer Graphics and Vision (GraphiCon 2006). 2006. С. 80-89.

**Статья поступила 21 февраля 2016 г.**

## Information about Authors

*Sergey A. Turko* - a student of National Research Nuclear University MEPhI. His research interest includes image processing and computer vision. E–mail: sergey.turko94@gmail.com

*Ilia V. Safonov* – Ph.D. in Computer Sciences. Associate professor of the Department of Computer Science and Control Systems. National Research Nuclear University MEPhI. Field of research: signal and image processing, computer vision, pattern recognition. E–mail: ilia.safonov@gmail.com

Address: Russia, 115409, Moscow, Kashirskoe highway, 31.

---

## Повышение резкости видеокадров для улучшения обнаружения ключевых точек

Турко С. А., Сафонов И. В.

***Актуальность.*** *Системы компьютерного зрения, относящиеся к визуальной навигации, одометрии и слежению, работают нестабильно на видео с размытыми подпоследовательностями кадров, так как на нечетких изображениях детектируется существенно меньше ключевых (или особых) точек. В данной работе рассматривается размытие, возникающее в процессе расфокусировки или перефокусировки оптических систем мобильных устройств. Предлагается математическая модель такого типа размытия.* ***Целью исследования является*** *оценка влияния размытия и последующего повышения резкости на обнаружение особых точек детектором углов Харриса и алгоритмом FAST. Рассматриваются два фильтра повышения резкости: локальное преобразование тонов, которое сокращает протяженность контурного перепада, и фильтр нерезкого маскирования, повышающий локальный контраст вдоль перепада. В фильтре нерезкого маскирования вместо Гауссова размытия используется билатеральный фильтр.* ***Результаты работы*** *фильтров демонстрируются на данных из тестового набора KITTI Vision Benchmark Suite и на видео, снятом камерой смартфона. Согласно предложенному референсному критерию качества, применение к видео фильтров, повышающих резкость, ведет к росту доли обнаруживаемых особых точек для обоих рассматриваемых детекторов. Причем положительное влияние последовательного применения фильтров локального преобразования тонов и нерезкого маскирования на FAST детектор весьма значительно, что позволяет в ряде случаев повысить стабильность функционирования систем компьютерного зрения.*

***Ключевые слова:*** *повышение резкости, детектор особых точек FAST, детектор углов Харриса, локальное преобразование тонов, фильтр нерезкого маскирования.*

## Информация об авторах

*Турко Сергей Александрович* – студент. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. Область научных интересов: обработка изображений и компьютерное зрение. E–mail: sergey.turko94@gmail.com

*Сафонов Илья Владимирович* – кандидат технических наук. Доцент кафедры информатики и процессов управления. Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ. Области научных интересов: обработка сигналов и изображений, компьютерное зрение, распознавание образов. E–mail: ilia.safonov@gmail.com

Адрес: 115409, Россия, г. Москва, Каширское шоссе, 31.

УДК 623.385.6

# Определение оптимального расположения базовых станций стандарта TETRA для создания системы определения и передачи координатно-временной информации о средствах связи

Семенов С. С., Смолеха В. П., Плут М. Н., Коморников П. М., Смолеха А. В.

*Перспективным и опирающимся на современную мировую практику направлением дальнейшего совершенствования системы технического обеспечения связи является определение и передача координатно-временной информации о средствах связи в режиме времени близком к реальному на цифровые карты автоматизированных рабочих мест должностных лиц органов управления.* ***Целью исследования*** *является разработка системы контроля, определения местоположения и передачи информации о техническом состоянии средств связи с отображением информации на цифровых картах автоматизированных рабочих мест должностных лиц системы технического обеспечения связи.* ***Постановка задачи:*** *составной частью исследования является расчет наименьшего количества базовых станций для систем профессиональной транкинговой радиотелефонной связи и места их размещения на графе сети автомобильных дорог Северо-Западного района Западного региона при ограничении на расстояние от каждого узла сети дорог до ближайшей к нему базовой станции, определяемый радиусом действия станции.* ***Используемые методы****: теория графов, алгоритм нахождения р-центров.* ***Новизна*** *заключается в том, что при применении апробированного алгоритма нахождения р-центров решается задача минимизации количества базовых станций и определяются места их размещения.* ***Результат****: количество базовых станций и места их размещения на графе сети дорог.* ***Практическая значимость*** *заключается в сокращении материальных затрат на внедрение оборудования, устройств и средств стандарта TETRA при разработке системы контроля, определения местоположения и передачи информации о техническом состоянии средств связи. Реализация алгоритма на ПЭВМ позволит сократить время проведения расчетов для графа сети дорог.*

***Ключевые слова:*** *система технического обеспечения связи, средства связи, технология радиочастотной идентификации, нахождение р-центров.*

## Введение

С целью обеспечения органов управления системы технического обеспечения связи координатно-временной информацией о средствах связи во времени близком к реальному предлагается внедрить автоматическую идентификацию на основе технологии радиочастотной идентификации [1, 2], оснастить комплексы связи аппаратурой спутниковой навигации ГЛОНАСС (ГЛОНАСС/GPS) или абонентскими терминалами стандарта TETRA (стандарт для систем профессиональной транкинговой радиотелефонной связи) [3].

Стандарт TETRA – цифровой стандарт, разработанный на основе технологии GSM и ориентированный на создание систем связи эффективно и экономично решающих задачу гибкой коммуникации между различными группами пользователей с обеспечением многоуровневой приоритезации вызовов и защищенности информации.

Стандарт TETRA позволяет обеспечить безопасность в сети связи, исключить несанкционированное использование ресурсов системы и обеспечить конфиденциальность передаваемой информации в сети, что способствует выбору данного стандарта для передачи данных о состоянии и местонахождении средств связи.

Защищенность параметров абонента обеспечивается посредством кодовой защиты конфигурации абонентского терминала и присвоения идентификаторов-псевдонимов.

Места размещения и минимальное количество базовых станций рассчитываются для графа существующей сети автомобильных дорог. Например, сети автомобильных дорог Западного региона по направлению г. Санкт-Петербург – г. Петрозаводск – г. Беломорск – г. Кандалакша – г. Аппатиты – г. Мурманск. Центры графа и радиусы определяются из матрицы взвешенных расстояний. Абсолютные центры (так называемые абсолютные *p*-центры) графа рассчитываются по известному алгоритму из раздела дискретной математики [4, 5].

Интерпретация задачи нахождения абсолютных *p*-центров теории графов заключается в нахождении наименьшего количества базовых станций и такое их размещение, чтобы расстояние от каждого узла сети дорог до ближайшей к нему базовой станции не превышало радиуса действия станции. Если же число базовых станций известно (ограничено выделенными лимитами), то требуется найти их минимальное количество и разместить их так, чтобы было минимально возможным расстояние от любого узла до ближайшей к нему базовой станции.

Если предположить, что базовые станции размещаются в вершинах соответствующего графа *G*, то задача будет состоять в нахождении *p*-центров графа для $p = 1, 2, 3, \ldots$ и т. д. до тех пор, пока число разделения *p*-центра не станет меньше или равно заданному расстоянию. Полученное (последнее) значение числа *p* будет наименьшим числом базовых станций, а *p*-центр – их оптимальным размещением, удовлетворяющим предъявляемым требованиям.

Алгоритм нахождения *p*-центров является частным случаем алгоритма решения более общей задачи, состоящей в определении *p*-центров, располагающихся, вообще говоря, не в вершинах графа.

Метод Хакими [4, 5], предназначенный для решения задач с одним абсолютным центром, не может быть обобщен на случай абсолютных *p*-центров. Для нахождения таких центров Сингер предложил некоторый эвристический метод – итерационный алгоритм решения задачи об абсолютных *p*-центрах графа.

Алгоритм является быстро сходящимся и обладает двумя преимуществами: процесс можно закончить сразу же, как только достигнута необходимая «точность» в расположении центров и метод легко видоизменить таким образом, чтобы можно было находить решения, близкие к оптимальному, и, следовательно, проводить анализ устойчивости решения.

Алгоритм построения абсолютного *p*-центра графа $G=(X, A)$ при известном *p* выглядит следующим образом:

1) вводится параметр λ (км), пусть λ=0;
2) увеличение λ на небольшую величину Δλ;
3) построение множества $Q_\lambda(x_i)$ для всех $x_i \in X_n$ и нахождение области $\Phi_\lambda$;
4) построение двудольного графа $G'=(X' \cup X, A')$, где $X'$ – множество вершин, каждая из которых соответствует некоторой области $\Phi_\lambda$, и $A'$ –

множество ребер, такое, что ребро между областью-вершиной и вершиной $x_i$ существует тогда и только тогда, когда $x_i$ может быть достигнута в этой области;

5) найти наименьшее доминирующее множество графа $G'$;
6) если число областей в приведенном выше множестве больше, чем $p$, то вернуться к шагу 2; в противном случае надо остановиться. Области этого множества образуют абсолютный $p$-центр исходного графа $G$, $\lambda$ является абсолютным $p$-радиусом.

Если требуется найти такое наименьшее значение $p$, что каждая вершина достижима из некоторого центра в пределах заданного критического расстояния, то шаги с 3 по 6 в приведенном выше алгоритме следует выполнять при $\lambda$, равном этому «критическому» значению. Соответствующее число областей в наименьшем доминирующем множестве является тогда требуемым значением для $p$, и области этого множества образуют искомый $p$-центр.

Пусть $\lambda$ зафиксировано и вычислены расстояния $\delta_i=\lambda/v_i$. Любое ребро графа либо достижимо целиком, либо частично, либо совсем не достижимо из вершины $x_i$ в пределах расстояния $\delta_i$. Если достижима только часть ребра (от какого-либо конца ребра до некоторой «предельной» точки на нем), то над предельной точкой ставится «метка». Эти метки содержат всю информацию, необходимую для описания множеств $Q_\lambda(x_i)$. Таким образом, $Q_\lambda(x_i)$ состоит из точек всех ребер (или частей ребер), принадлежащих кратчайшим маршрутам между метками и вершиной $x_i$.

После размещения всех меток (для всех вершин) каждое ребро будет разделено на ряд участков; каждый участок характеризуется теми вершинами, которые из него могут быть достигнуты (то есть из точек этого участка). Таким образом, любой участок описывается бинарным вектором $\{j_1, j_2, ..., j_n\}$ длины $n$, в котором $j_k = 1$, если вершина $x_k$ достижима из этого участка, и $j_k=0$ в противном случае.

Поскольку область $\Phi_\lambda$ достижима только из тех вершин, для которых $j_k=1$ (в бинарном векторном представлении этой области) и не из каких других, то эти бинарные векторы называются строгими пересечениями ($SI$).

Представление области бинарным вектором не содержит никакой информации о месте ее расположения на графе. Однако такое представление выгодно с вычислительной точки зрения: оно не предъявляет больших требований к памяти машины и позволяет уменьшить время вычисления, особенно при выполнении шага 5 алгоритма. Если абсолютный $p$-центр описан «на языке строгих пересечений», то дальнейшая процедура осуществляется чрезвычайно просто: надо лишь выяснить, какие участки ребер соответствуют этим строгим пересечениям.

На шаге 4 алгоритма строится двудольный граф $G'=(X'\cup X,A')$, у которого вершины из $X'$ представляют области $\Phi_\lambda$. Это может привести к графу больших размеров, что сильно увеличит время вычисления на шаге 5. Уменьшить размеры графа $G'$ удается с помощью приведенной ниже теоремы и исключить те области, которые не влияют на получаемое оптимальное решение (но если существует больше одного оптимального решения, то при такой процедуре

некоторые из них теряются). Теорема: при заданной величине $X$ для получения некоторого минимального доминирующего множества графа $G'$ можно предварительно исключить из множества $X'$ все вершины, соответствующие тем $SI$, над которыми доминируют другие $SI$ в $X'$, причем $(SI)_1$ доминирует над $(SI)_2$, если $(SI)_1 \otimes (SI)_2=(SI)_2$.

В качестве примера взят фрагмент подграфа существующего графа сети автомобильных дорог Северо-Западного федерального округа (рис. 1).

Число, стоящее около любого ребра, задает его длину в километрах, вес каждой вершины графа равен единице. Требуется найти абсолютный $p$-центр с минимально возможной величиной параметра $p$ и такой, чтобы каждая вершина графа отстояла хотя бы от одного из этих $p$ центров на расстоянии, не превосходящем 35 километров (ограничение).

Множество $Q_\lambda(5)$ отмечено точками. Они расставлялись сразу же в процессе последовательного «прохождения» ребер. Числа в кружках, стоящие около произвольной метки, указывают «номера» вершин, которым эта метка соответствует. Так, кружок 1,3 на ребре (2,3) означает, что только отмеченная точка достижима из вершин 1 и 3 в пределах расстояния 35 км. На рисунке 2 точками около ребер показано достижимое множество $Q_\lambda(5)$, соответствующее вершине 5. Всего в данном примере существует 33 участка ребер, включая пустой участок (из которого ни одна вершина не может достигаться в пределах расстояния 35 километров).

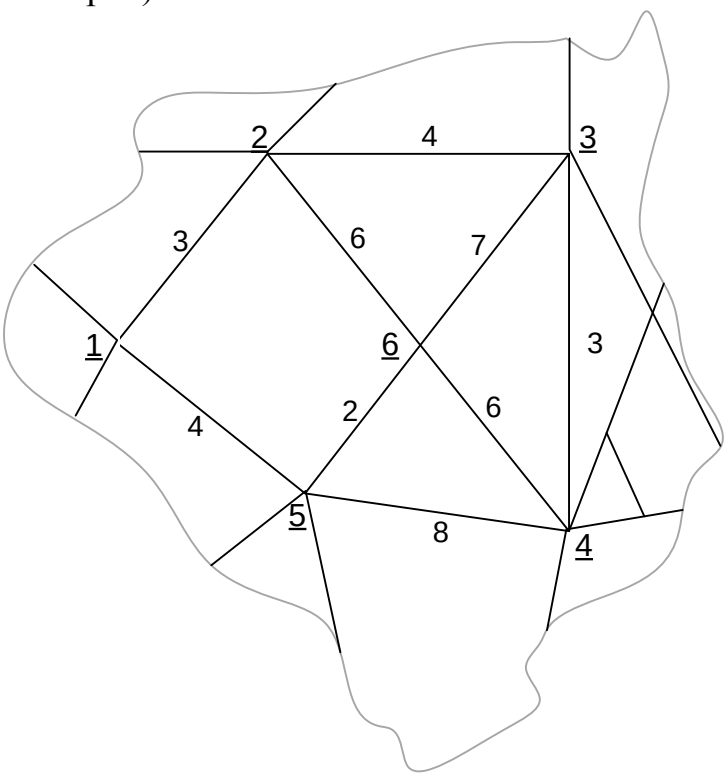



Рис. 1. Фрагмент подграфа сети автомобильных дорог Северо-Западного федерального округа

Для $\lambda$=35 км на рисунке 2 показаны метки, определяющие множества $Q_\lambda(x_i)$.

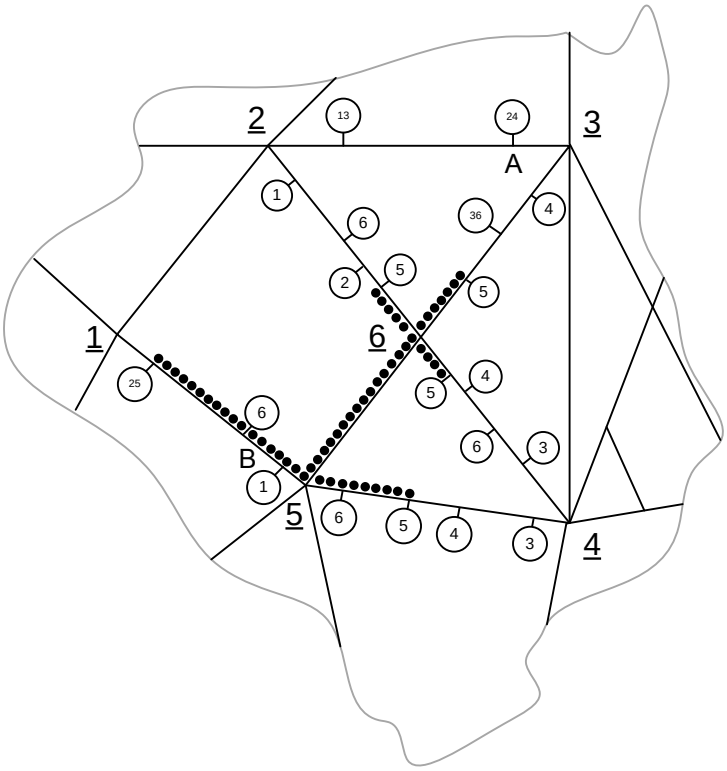



Рис. 2. Фрагмент подграфа сети автомобильных дорог Северо-Западного федерального округа с метками для достижимых множеств $Q_\lambda(x_i)$

Пустой участок расположен между метками 4 и 5 на ребре (4,5). Некоторые из этих 33 участков имеют одинаковые *SI*. Существует всего 18 областей со следующими *SI:*

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| 1. 000000 | 5. 0000010 | 9. 001100 | 13. 000101 | 17. 110010 |
| 2. 010000 | 6. 0000001 | 10. 100010 | 14. 001001 | 18. 100011 |
| 3. 001000 | 7. 0000011 | 11. 011000 | 15. 111000 | |
| 4. 000100 | 8. 1100000 | 12. 010001 | 16. 011100 | |

Так, например, участок между метками 1 и 6 на ребре (1, 5) принадлежит области с *SI*, равным 100011, поскольку лишь из точек графа, лежащих между этими двумя метками, достигается вершины 1, 5 и 6 (и никакие другие) в пределах расстояния $\lambda = 35$.

После исключения тех *SI*, которые доминируются другими *SI*, остается только 7 областей (с номерами *SI* от 12 до 18). Граф *G'* после выполнения шага 4 алгоритма выглядит так, как показано на рисунке 3.

В приведенном примере наименьшее множество (легко) строится с помощью прямого последовательного перебора, оно «порождается» *SI* с номерами 16 и 18 в приведенном выше списке. Область, соответствующая *SI* с номером 16, состоит из одной точки, расположенной на ребре (2,3) в том месте, где находится кружок (24). На рисунке 2 эта точка обозначена буквой *A*. Область, соответствующая *SI* с номером 18, представляет собой участок ребра (1,5) между метками 6 и 1; на рисунке 2 она обозначена буквой *B*.

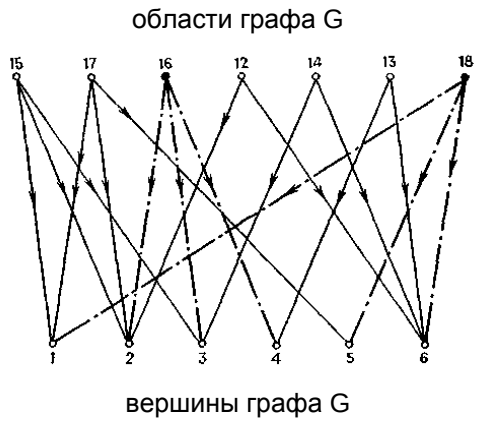



Рис. 3. Граф *G'* после выполнения шага 4 алгоритма
(области в наименьшем доминирующем множестве обозначены «●»)

Таким образом, при $\lambda$ = 35 км требуется два центра; один расположен в точке *A,* а другой – в любой точке области *B*. Поскольку область *A* является точкой, то два указанных центра образуют также абсолютный 2-центр и $\lambda$=35 является минимально возможным критическим расстоянием для существования 2-центра. Поэтому при $\lambda$<35 область *A* исчезнет совсем, и тогда требуется размещать 3-центр.

В связи с громоздкостью графа автомобильных дорог Северо-Западного региона целесообразно граф разбивать на подграфы, т. к. число повторений шагов алгоритма с 3 по 6 (для различных значений $\lambda$) всех повторений, которые необходимо осуществить для получения абсолютного *p*-центра с заданной точностью может достигать нескольких сотен.

В работе [4] представлены времена вычисления (в секундах) и числа итераций, требуемые при построении абсолютных 1-, 2-, 3-, 4- и 5-центров для случайно выбранных связных и неориентированных графов. Приведенный алгоритм может эффективно применяться при нахождении абсолютных *p*-центров достаточно больших графов.

## Выводы

Представленный алгоритм позволяет рассчитать минимальное количество базовых станций цифрового стандарта TETRA и места их размещения на графе автомобильных дорог.

Дальнейшей перспективой исследований является реализация приведенного алгоритма в геоинформационной системе КБ «Панорама» с написанием подпрограммы, позволяющей после выделения зоны ответственности на цифровой карте получить искомое значение минимального количества и мест размещения базовых станций на графе дорог.

Приведенные расчеты сделаны на примере подграфа сети автомобильных дорог Северо-Западного района Западного региона.

## Литература

1. Багдасарян А. С., Багдасарян С. А., Кащенко Г. А., Николаева С. А., Семенов Р. В. Система автоматической идентификации управления перемещением грузов на железнодорожном транспорте // Электроника: наука, технология, бизнес. 2013. № 3. С. 92 – 98.

2. Багдасарян А. С., Николаева О. В., Подшивалова Г. В., Семенов Р. В. Оценка дальности действия систем радиочастотной идентификации в условиях природных и техногенных катастроф // Теория и техника радиосвязи. 2012. № 4. С. 11 – 16.

3. Боговик А. В., Нестеренко А. Г., Одоевский С. М., Рашич О. В., Паращук И. Б., Салюк Д. В., Скоропад А. В. Новые информационные и сетевые технологии в системах управления военного назначения. Часть 1. Новые сетевые технологии в системах управления военного назначения. СПб.: ВАС, 2010. 432 с.

4. Кононюк А. Е. Дискретно-непрерывная математика. Книга 7. Графы. Часть 2. Киев: Освіта України, 2015. 513 с.

5. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. М.: Мир, 1978. 432 с.

## References

1. Bagdasaryan A. S., Bagdasaryan S. A., Kashchenko G. A., Nikolaeva S. A., Semenov R. V. *Sistema avtomaticheskoj identifikacii upravleniya peremeshcheniem gruzov na zheleznodorozhnom transporte* [System of automatic identification of management of movement of freights on railway transport]. *Elektronika: nauka, tekhnologiya, biznes*, 2013, no. 3, pp. 92-98 (in Russian).

2. Bagdasaryan A. S., Nikolaeva O. V., Podshivalova G. V., Semenov R. V. *Ocenka dal'nosti dejstviya system radiochastotnoj identifikacii v usloviyah prirodnyh i tekhnogennyh katastrof* [Assessment of range of action of systems of radio-frequency identification in the conditions of natural and technogenic catastrophes]. *Teoriya i tekhnika radiosvyazi*, 2012, no. 4, pp. 11-16 (in Russian).

3. Bogovik A. V., Nesterenko A. G., Odoevskij S. M., Rashich O. V., Parashchuk I. B., Salyuk D. V., Skoropad A. V. *Novye informacionnye i setevye tekhnologii v sistemah upravleniya voennogo naznacheniya. CHast' 1. Novye setevye tekhnologii v sistemah upravleniya voennogo naznacheniya* [New information and network technologies in military control systems. Part 1. New network technologies in military control systems]. Saint-Petersburg, Budyonny Military Academy of Communications, 2010. 432 p. (in Russian).

4. Kononyuk A. E. *Diskretno-nepreryvnaya matematika. Kniga 7. Grafy. CHast' 2* [Discrete and continuous mathematics. Book 7. Columns. Part 2]. Kiev, Osvita Ukraine, 2015. 513 p. (in Russian).

5. Kristofides N. *Teoriya grafov. Algoritmicheskij podhod* [Theory of counts. Algorithmic approach]. Moscow, World, 1978. 432 p. (in Russian).

**Статья поступила 11 февраля 2016 г.**

## Информация об авторах

*Семенов Сергей Сергеевич* – доктор технических наук, доцент. Профессор кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: безопасность связи; техническое обеспечение связи; качество военной продукции; программирование при решении различных прикладных задач. E–mail: semsem@yandex.ru

*Смолеха Виталий Петрович* – соискатель ученой степени кандидата военных наук. Доцент кафедры телекоммуникационных технологий и сетей. Ульяновский государственный университет. Область научных интересов: теория инфокоммуникационных систем и сетей и теория цифровой обработки сигналов. E–mail: v.0750@yandex.ru

*Плут Михаил Николаевич* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: техническое обеспечение связи. E-mail: mplout@mail.ru.

*Коморников Павел Маркович* – кандидат технических наук, доцент. Доцент кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: метрологическое обеспечение; управление запасами; техническое обеспечение связи. E–mail: nnoteer@mail.ru.

*Смолеха Алексей Витальевич* – соискатель ученой степени кандидата технических наук. Адъюнкт кафедры технического обеспечения связи и автоматизации. Военная академия связи. Область научных интересов: техническое обеспечение связи; технология радиочастотной идентификации. E-mail: a.1802@yandex.ru

Адрес: 194064, Россия, г. Санкт-Петербург, Тихорецкий пр., д. 3.

---

# Determining the Optimal Location of TETRA Standard Base Stations to Create a System of Definitions and the Transfer a Coordinate-Time Information on the Means of Communication

S. S. Semenov, V. P. Smoleha, M. N. Plut, P. M. Komornikov, A. V. Smoleha

*A promising and relying on modern world practice the direction of further improvement of the system of technical maintenance of communication is to define and transfer a coordinate-time information on the means of communication in the mode of the time close to real digital map of the automated workplaces officials controls.* ***Purpose of research*** *is to develop a control system, positioning and transfer of information on the technical condition of communication with the display of information on digital maps of the automated workplaces officials TMC.* ***Formulation of the problem****: an integral part of the research is to calculate the smallest number of base stations for professional trunked radio communication systems, as well as the need to find placements base stations on the graph of the road network of the North-West District of the Western Region. In solving the problem there is a limit to the distance between each node of the network of roads and the nearest base station is identical to the radius of the station steps.* ***Methods used:*** *graph theory, algorithm for finding the p-centers.* ***The novelty:*** *is that the application of a proven algorithm for finding the p centers solved the problem of minimizing the number of base stations and identifies their locations.* ***The result:*** *the number of base stations and their location on the graph of the road network.* ***The***

***practical significance*** *is to reduce material costs for the introduction of the equipment, the TETRA standard devices and tools in the development of control systems, positioning and transfer of information on the technical condition means of communication. The implementation of the algorithm on PC will reduce the time of calculation for the graph of the road network.*

***Key words:*** *system of technical maintenance of communication, means of communication, radio frequency identification technology, finding the p-centers.*

## Information about Authors

*Sergey Sergeevich Semenov* – Dr. habil. of Engineering Sciences, Associate Professor. Professor at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of communications. Field of research: Communication security; information security; technical maintenance of communication; the quality of products, programming for solving various applications. E–mail: semsem@yandex.ru

*Vitaly Petrovich Smoleha* – Ph.D. of Military Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of telecommunications technologies and networks. Ulyanovsk state university. Field of research: theory of communication systems and networks and the theory of digital signal processing. E–mail: v.0750@yandex.ru-

*Mihail Nikolaevich Plut* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of Communications. Field of research: technical maintenance of communication. E–mail: mplout@mail.ru

*Pavel Markovich Komornikov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of Communications. Field of research: metrological maintenance; inventory management; technical maintenance of communication. E–mail: nnoteer@mail.ru

*Alexsey Vitalevich Smoleha* – Postgraduate, military student at the Department of technical maintenance of communication and automation. Military Academy of Communications. Field of research: technical maintenance of communication; technology of radio-frequency identification. E–mail: a.1802@yandex.ru

Address: Russia, 194064, Saint-Petersburg, Tihoreckiy prospekt, 3.

УДК 004.3

# Исследование возможности импортозамещения микроконтроллеров семейства SAM D20 компании Atmel отечественными аналогами

Аминев Д. А., Охломенко И. В., Никитенко М. В.,
Сачкова Н. А., Гусева П. А.

***Постановка задачи:*** *в результате современной геополитики на Россию наложены санкции относительно импорта различных высокотехнологичных решений западного производства. Производство микроконтроллеров и процессоров не было налажено на современном мировом уровне еще со времен развала СССР. Как известно, процессор - главная часть аппаратного обеспечения компьютера или программируемого логического контроллера, исполняющая машинные инструкции, и, соответственно, без него сегодня не может обойтись ни одно высокотехнологическое устройство. Поэтому актуальностью данной работы является задача поиска отечественных аналогов зарубежных микроконтроллеров и микропроцессоров для импортозамещения в реалиях санкций.* ***Целью работы*** *является поиск отечественных аналогов процессоров семейства SAM D20 компании Atmel, сравнение их характеристик, а также рассмотрение эволюции данных решений и их будущего. Сформулировать предложения по импортозамещению.* ***Результат:*** *Рассмотрена актуальность замещения импортных процессоров отечественными аналогами, производимыми на данный момент времени, а также планируемых к выпуску в ближайшее время. Приводятся характеристики семейства процессоров SAM D20 компании Atmel, а также описание различных технологий и периферийных выводов, используемых в данном семействе. Рассмотрены характеристики семейств отечественных микроконтроллеров и микропроцессоров с аналогичными архитектурой, набором функций и интерфейсов и другими параметрами следующих производителей: «Байкал Электроникс», Группа компаний «ЭЛВИС», НИИСИ РАН, Юникор микросистемы, ОАО «Ангстрем», НИИМА «Прогресс», НТЦ «Модуль», АО «МЦСТ», «ИДМ-ПЛЮС», ОАО «Мультиклет», ООО «КМ211», ЗАО «ПКК «Миландр», NTLab, ОАО «НИИЭТ». Проведено их сравнение с характеристиками семейства SAM D20 и по интегральной совокупности характеристик в различных условиях и задачах сделаны выводы по возможности его импортозамещения конкретными отечественными микросхемами.*

***Ключевые слова:*** *микроконтроллер, микропроцессор, микросхема, импортозамещение, отечественные процессоры, сравнение характеристик, интерфейс, производительность.*

## Актуальность

На данный момент в вычислительных, радиотехнических и электронных системах используется значительное количество импортной элементной базы, в том числе микроконтроллеров и микропроцессоров. В последнее время возникают трудности с поставками зарубежной продукции и повышается актуальность импортозамещения [1].

Вызывает опасение то, что практически всё современное программное обеспечение и оборудование для вычислительной техники разрабатывается и поставляется зарубежными производителями. В связи с этим, крайне необходимо поддерживать отечественных разработчиков, которые не могут в сложившейся обстановке нечестной конкуренции вывести своё оборудование на должный уровень применения [2].

Микроконтроллеры американской фирмы Atmel широко представлены на российском рынке и являются популярными при разработке как единичных макетных образцов различных вычислительных систем, так и при выпуске

крупных серий, поскольку являются многофункциональными, надежными и очень дешевыми.

Семейство SAM D20 отличается высокой производительностью, широким набором функций и низким энергопотреблением, что существенно для систем с автономным энергообеспечением [3]. Поэтому актуальной является задача его импортозамещения отечественными аналогами.

## Характеристики семейства процессоров SAM D20 компании Atmel

SAM D20 – семейство маломощных микроконтроллеров [4, 5], использующих 32-битный процессор ARM Cortex-M0+ с частотой до 48 МГц, числом выводов до 64, 256 Кб флэш и 32 Кб статической памяти SRAM. SAM D20 имеет до 6 последовательных коммуникационных модулей SERCOM, 12-разрядный АЦП, аппаратную поддержку сенсорного ввода и пр. Доступ к портам ввода/вывода микроконтроллеров осуществляется за 1 машинный цикл, имеется 4...8-канальная система событий и 8-канальный контроллер прямого доступа к памяти (DMA). Отличительные характеристики микросхем семейства SAM D20 представлены в таблице 1.

Таблица 1 − Характеристики микроконтроллеров Atmel семейства SAM D20

| **Характеристики** | **SAM D20J** | **SAM D20G** | **SAM D20E** |
|---|---|---|---|
| Число выводов | 64 | 48 | 32 |
| Выводы общего назн. | 52 | 38 | 26 |
| Кол-во ТС | 8 | 6 | 6 |
| Кол-во SERCOM | 6 | 6 | 4 |
| Канальность АЦП | 20 | 14 | 10 |
| Матрица PTC | 16x16 | 12x10 | 10x6 |
| Тип корпуса | QFN, TQFP, UFBGA | QFN, TQFP, WLCSP | QFN, TQFP |

Модуль SERCOM может быть сконфигурирован как интерфейсы: UART/USART с автоматической установкой скорости передачи данных и поддержкой IrDA протокола; SPI; $I^2C$ с частотой до 3,4 МГц. Также имеются: контроллер USB 2.0 со скоростью до 12 Мбит/с; 2-канальный модуль I2S; до 8 16-битных таймеров/счетчиков (ТС); до 3 16-битных ТС, оптимизированных для систем управления; контроллер сенсорного интерфейса (PTC) с поддержкой до 256 каналов для сенсорных клавиш, слайдеров, дисков и датчиков присутствия; 32-битные часы реального времени (RTC) с календарем; 12-битный АЦП и 10-битный ЦАП с частотой дискретизации до 350 Квыборок/с; аналоговые компараторы.

Кварцевые генераторы SAM D20: XOSC32K и внутренний OSC32K на 32,768 КГц, XOSC на 0,4-32 МГц, пониженного энергопотребления OSCULP32K на 32 КГц, высокоточный внутренний OSC8M на 8 МГц, синхронизатор DFLL48M на 48 МГц. Существует возможность работы от

внешнего или внутреннего тактового генератора с функцией переключения между ними "на лету".

Структура микроконтроллера представлена на рис. 1.

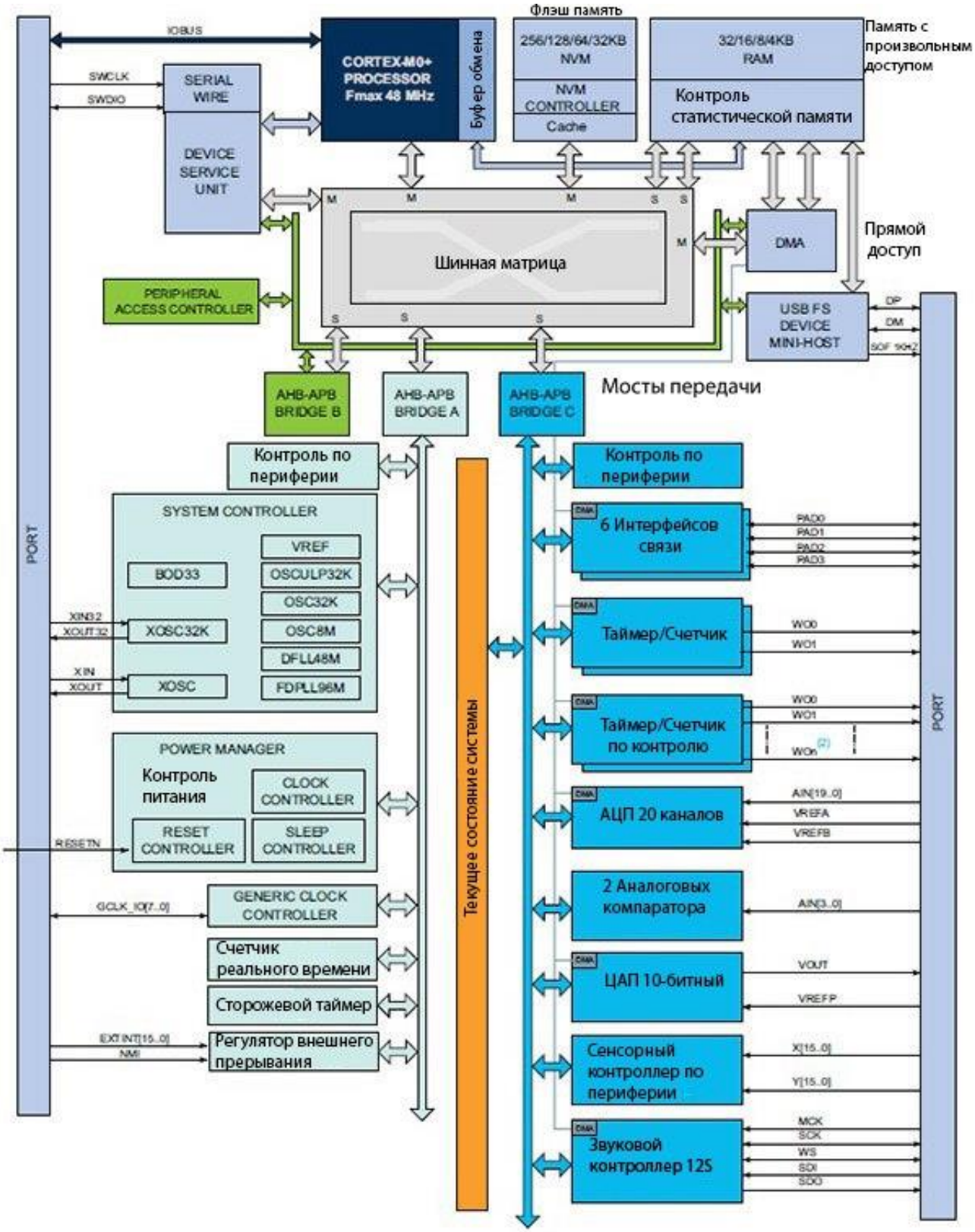



Рис. 1. Структура микроконтроллера Atmel SAM D20

Блок ТС включает в себя несколько индивидуально программируемых 16-разрядных экземпляров, каждый из которых может выполнять генерацию частот и форм сигналов, захват времени и измерение частоты. ТС предназначены для контроля такой периферии как импульсные источники питания, освещение и управление двигателем. Контроллер DMA, обеспечивающий обмен данными минуя центральный процессор, в SAM D20 имеет до 12 каналов и поддерживает транзакции до 256 КБ с учетом приоритета, подключение к АЦП, ЦАП, I2S, SERCOM, ТС. РТС позволяет подключать емкостной сенсор с кнопками. Звуковой контроллер I2S обеспечивает двунаправленный, синхронный цифровой канал с внешних аудио устройств, имеет встроенную фазовую автоподстройку частоты (ФАПЧ).

Семейство имеет низкую потребляемую мощность: 70 мкАх48 МГцх2,6 В=9 мВт. При сохранении данных в RAM и работающих RTC потребляется ток 3,5 мкА.

## Отечественные микроконтроллеры и микропроцессоры

Исследование рынка показало, что, несмотря на технологическое отставание от крупных мировых корпораций, в России имеется несколько крупных и средних компаний разработчиков и производителей современных отечественных микросхем контроллеров и процессоров (Таблица 2).

Таблица 2 − Отечественные микросхемы контроллеров и процессоров

| Производитель | Архитектура | Семейство |
|---|---|---|
| «Байкал Электроникс» | ARM64 | Baikal M, Baikal M/S |
| | MIPS32 | Baikal-T1 |
| Группа компаний «ЭЛВИС» | MIPS32 + DSP | Мультикор, NVCom-01 |
| | ARM32 | VIP-1 |
| НИИСИ РАН | MIPS | KOMDIV-32, 5890ВМх, 1900ВМх, 1907ВМх, 9011ВАх |
| Юникор микросистемы | RISC + DSP | UNC80xx, UNC320 («Орхидея») |
| ОАО «Ангстрем» | MIPS | 1876ВМ |
| НИИМА «Прогресс» | RISC + DSP | К5512БП1Ф, 5512БП2Ф |
| НТЦ «Модуль» | ARM + DSP | Л1879ВМ1, 1879ВМ3 |
| | NeuroMatrix | 1879ВЯ1Я, К1879ХБ1Я, 1879ВМ5Я |
| АО «МЦСТ» | SPARC64 | МЦСТ-R100, МЦСТ-R150, МЦСТ-R500, МЦСТ-R500S, МЦСТ-R1000 |
| | Эльбрус64 | Эльбрус-2000, Эльбрус-S, Эльбрус-4С, Эльбрус-8С, Эльбрус-16С |
| | Эльбрус64 + DSP | Эльбрус-2С+ |
| «ИДМ-ПЛЮС» | Регистр-стек | ТФ-16 |
| ОАО «Мультиклет» | Мультиклеточная | MULTICLET P1, MULTICLET R1-1 |

| | | |
|---|---|---|
| ООО «КМ211» | RISC | КВАРК |
| ЗАО«ПКК«Миландр» | ARM | 1886ВЕх, 1986ВЕх, 1901ВЦ1Т |
| NTLab | MCU + DSP | NT1004, NT1018 |
| ОАО «НИИЭТ» | AVR RISC | Н1830ВЕ51, 1882Вх, 1887ВЕх, 1874ВЕх, К1921ВК01Т |

Как видно из таблицы, здесь представлены микроконтроллеры и микропроцессоры различных архитектур – RISC, регистр-стековая, мультиклеточная и др., а также микросхемы с процессорами цифровой обработки сигналов. Несмотря на отличие в архитектуре с Atmel SAM D20, значительные сходства микросхем могут наблюдаться по остальным параметрам, поэтому для широты обзора целесообразно провести их рассмотрение и гипотетически предположить такое импортозамещение.

Компания «Байкал Электроникс» [6] выпускает МК семейства Baikal-T1 по технологии 28 нм с тактовой частотой до 1,2 ГГц, числом ядер до 2, разрядностью 32 бит, энергопотреблением 5 Вт, размером корпуса 25х25 мм. Интерфейсы: 10Gb Ethernet, 2x1Gb Ethernet, PCIex4, 2xSATA 3.0, USB 2.0, DDR3-1600, GPIO, UART, SPI, I2C. Семейства Baikal M, Baikal M/S с архитектурой ARM cortex A57 пока не производятся. *По набору интерфейсов и производительности Baikal-T1 превосходит Atmel SAM 20, однако его энергопотребление выше более чем в 500 раз и поэтому его нельзя отнести к импортозамещающим аналогам.*

Группа компаний «ЭЛВИС» [7] выпускает семейство видеопроцессоров VIP-1, выполненных по технологии 40 нм в корпусе 1296 HFCBGA. Семейство имеет два ядра ARM Cortex-A9 с частотой до 1 ГГц и производительностью 4000 DMIPS, видеоускоритель, видеопроцессор и навигационное ядро с поддержкой GPS, ГЛОНАСС и Бэйдоу. Интерфейсы: Ethernet MAC 10/100/1000 МГц; 3xI2C; 2xSPI; I2S; 4xUART; USB 2.0 до 480 Мбит/с; ввод и вывод видео, контроллер LCD-дисплея. Потребление микропроцессора: ядра – 1Вт при 400 МГц; пиковое не превышает 2,9 Вт; режим сна – 50 мкВт, имеется специальная система управления энергопотреблением. *Несмотря на превосходство в наборе интерфейсов и производительности, процессорное ядро VIP-1 имеет в 100 раз большее энергопотребление, чем Atmel SAM D20. Поскольку VIP-1 имеет избыточность в части видеопроцессора и навигационного ядра, можно рассматривать возможность импортозамещения им Atmel SAM 20 только в случае использования при решении задач обработки видео и навигации.*

НИИСИ РАН [8] – разработчик нескольких семейств 32-битных МК.

Микропроцессор (МП) 5890ВМ1Т с частотой 33 МГц в 108 выводном корпусе для построения резервируемых отказоустойчивых вычислительных систем имеет систему команд КОМДИВ и процессор с СР0, СР1, кэш 16 Кб. МК 5890ВЕ1Т с частотой 33 МГц, энергопотреблением 3,3 Вх640 мА и технологией 0,5 мкм включает: процессор с СР0, СР1, кэш 16 Кбайт, контроллер СОЗУ, ПЗУ, 3 таймера, 3xUART, PCI 25 МГц, 16xGPIO, корпус на

240 выводов. Троированный сбоеустойчивый МП 1900ВМ2Т, сделанный по технологии 0,35 мкм в 108-выводном корпусе, имеет процессор с частотой 66 МГц с CP0, CP1, кэш 8 Кбайт, IFUnit.

МК 1907ВМ014 по технологии 0,25 мкм в 256 выводном корпусе имеет: процессор с частотой 100 МГц с CP0, CP1, кэш 16 Кбайт, контроллеры СОЗУ, ППЗУ, 32xGPIO, 2xUART, 2xМКИО по ГОСТ Р 52070-2003 с резервированием, 2xSpaceWire до 400 Мбит/с, SPI, JTAG, 3 таймера, энергопотребление 5 Вт при 100 МГц, 2 Вт при 40 МГц. МК 1907ВМ044 для создания бортовых управляющих систем, сделанный по технологии 0,25 мкм в 256 выводном корпусе, имеет: процессор с частотой 66 МГц с CP0, CP1, кэш 16 Кбайт; контроллеры СОЗУ, ППЗУ, GPIO; 2xUART; 2x МКИО по ГОСТ Р 52070-2003 с резервированием; SpaceWire с резервным каналом; SPI; JTAG; 3 таймера, энергопотребление 7 Вт. МК 1907ВМ038 в 675 выводном корпусе для создания бортовых систем цифровой обработки сигналов имеет: процессор CP0 CP1, АЛУ, кэш-16 Кбайт, TLB; контроллеры DDR2 2 Гбит/с, RapidIO, МКИО по ГОСТ Р 52070-2003 с резервированием, 2xUART, 32xGPIO, SpaceWire с резервным каналом, SPI, NAND, JTAG; 3 таймера; часы реального времени; производительность 2 Гфлопс; энергопотребление 8 Вт. МК 1907ВМ056 по технологии 0,25 мкм имеет: процессор с CP0, CP1, кэш 16 Кбайт; контроллеры СОЗУ, ППЗУ, 32xGPIO; 2xUART, 2xМКИО по ГОСТ Р 52070-2003 с резервированием, SpaceWire с коммутатором 8 кан., 2xSPI, CAN, I2C, JTAG; 3 таймера; питание 3,3 В. МК 1907ВМ066 со встроенным сопроцессором обработки и сравнения изображений имеет: процессор с CP0, CP1, кэш 16 Кбайт; контроллеры СОЗУ, serial RapidIO, МКИО по ГОСТ Р 52070-2003 с резервированием, 2xUART, SpaceWire, SPI, I2C, JTAG; 3 таймера.

МК 9011ВА016 в 675 выводном PGA корпусе, включает: процессор 1907ВМ056 частотой 100 МГц; память 1667РА014 2 Мб; ПЛИС 5576ХС8Т; интерфейсы по ГОСТ Р 52070-2003, CAN, GPIO, RS-232, SPI и SpaceWire. Энергопотребление при 100 МГц - 15 Вт, без использования ПЛИС - 10 Вт.

64-разрядный МК 1907ВМ028 в корпусе с 675 выводами для построения высокопроизводительных вычислительных комплексов с RISC архитектурой КОМДИВ64 (имеется поддержка 32 разрядов) имеет раздельные кэши первого уровня по 16 Кбайт каждый; кэш-память 2-го уровня размером 256 Кбайт; контроллеры DMA, RapidIO 4X, PCI, ППЗУ, Ethernet, I2C; таймеры; энергопотребление на 150 МГц 5,5 Вт, 66 МГц - 2 Вт; корпус керамический матричный.

*МК семейства 1907ВМх пересекаются с Atmel SAM 20 только по набору контроллеров интерфейсов и порядку частоты процессора. По остальным параметрам, в особенности по энергопотреблению и наличию АЦП ЦАП, они категорично различны. Поэтому их нельзя рассматривать в качестве аналогов.*

Компания «Юникор микросистемс» [9, 10] выпускает два семейства микроконтроллеров UNC80xx и UNC320. 8-разрядные МК UNC80xx предназначены для использования в системах управления, в том числе реального времени, обработки звука. UNC80A03 имеет 128 Кб флэш ПЗУ, 4 Кб

ОЗУ, 64 Кб внешнее ОЗУ. Семейство UNC320 (Орхидея) имеет: 32-разрядную архитектуру, совмещающую RISC и DSP; адресное пространство 4 Гб; диспетчеры и кэш; управление потребляемой мощностью. Микроконтроллер UNC320IPP01 предназначен для портативных высокопроизводительных устройств с низким энергопотреблением (КПК и др.), UNC321VEC04 для кодирования и декодирования MPEG-4. *МК UNC80A03 и UNC320IPP01 представляются интересными в части импортозамещения Atmel SAM D20, но ввиду отсутствия в открытых источниках полной информации по набору их интерфейсов, производительности и энергопотреблению невозможно сделать окончательный вывод.*

ОАО «Ангстрем» [11] выпускает микропроцессорный комплект серии Л1876, предназначенный для построения высокопроизводительных 32-разрядных ЭВМ, контроллеров и других средств вычислительной и управляющей электронной техники. Комплект состоит из нескольких микросхем: RISC микропроцессор; сопроцессоры; контроллеры шины VME; графический контроллер. Максимальная тактовая частота RISC микропроцессор и графического контроллера 25 МГц и 135 МГц соответственно, а потребляемые мощности 4 Вт и 1,8 Вт. *Комплект Л1876 категорично не может заменить Atmel SAM D20, поскольку имеет единственный интерфейс VME, реализуется в нескольких микросхемах, энергопотребление каждой из которых в сотни раз больше Atmel.*

НИИМА «Прогресс» [12] выпускает МК К5512БП1Ф и радиационно-стойкий 5512БП2Ф для использования в аппаратуре ответственного назначения. Изготовленный по технологии 0,18 мкм, 32-разрядный микроконтроллер К5512БП1Ф с тактовой частотой до 150 МГц содержит: сопроцессор модульной арифметики с разрядностью 1024 и частотой 50 МГц; 4 блока БМК по 300 Квентилей; масочное ПЗУ 128 К х 32; ОЗУ 64 К х 32; интерфейсы SPI, $I^2C$, GPIO; таймер. МК 5512БП2Ф, сделанный по технологии 0,24 мкм и имеющий 32-разрядное микропроцессорное ядро MIPS с частотой до 66 МГц, содержит: 3хБМК 100 Квентилей; масочное ПЗУ 64 К х 32; ОЗУ 32 К х 32; ФАПЧ на частоту до 150 МГц; интерфейсы 3xSPI, 8-разрядный 3xGPIO, UART. Энергопотребление К5512БП1Ф до 0,4 Вт, а 5512БП2Ф до 2 Вт. Обе микросхемы выпускаются в 325 выводном корпусе типа CPGA. *По набору интерфейсов и быстродействию к Atmel SAM D20 наиболее близок МК 5512БП2Ф. Однако, если поставить приоритет на энергопотребление, то К5512БП1Ф будет более подходящей заменой.*

НТЦ «Модуль» [13] разрабатывает и производит высокопроизводительные процессорные ядра с архитектурой DSP/RISC и микроконтроллеры. МК 1879ВЯ1Я – цифровой унифицированный программный приемник аналоговых сигналов (в том числе сигналов глобальной навигационной системы (ГНС)), осуществляющий их преобразование в цифровой код и программную цифровую обработку. Декодер цифрового ТВЧ сигнала К1879ХБ1Я для ТВ приставок и пр. Л1879ВМ1 представляет собой высокопроизводительный микропроцессор с элементами VLIW и SIMD архитектур, содержащий устройства управления, вычисления

адреса и обработки скаляров, интерфейсы для внешней памяти и коммуникационные порты. МК 1879ВМ3 с АЦП и ЦАП для предварительной обработки широкополосных аналоговых сигналов, формирования потока данных для вторичной обработки, восстановления аналогового сигнала после вторичной обработки. 1879ВМ5Я представляет собой высокопроизводительный микропроцессор ЦОС с векторно-конвейерной VLIW/SIMD архитектурой на базе 64-разрядного ядра NeuroMatrix. Характеристики этих микросхем приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Характеристики этих микросхем компании НТЦ «Модуль»

| **Наименование** | **1879ВЯ1Я** | **К1879ХБ1Я** | **Л1879ВМ1** | **1879ВМ3** | **1879ВМ5Я** |
|---|---|---|---|---|---|
| Процессор | 2xDSP 64разр NMC3 RISC, ARM1176JFZ | ARM1176JZF, ЦПС NMC3, 324 МГц | RISC 40 МГц | 150 МГц | RISC 320 МГц |
| Технология, корпус | 90нм, BGA484 | PBGA-544 | 0.5 мкм, BGA256 | 0,25 мкм, BGA576 | 90нм, 416 PBGA |
| АЦП/ЦАП и пр. | АЦП, БПОС, 16 Мбит ОЗУ | декодер MPEG2 DVB-CSA | Вект. сопр. 3x32x64-разр. RAM | 2xАЦП, 4xЦАП, Различные ТС | 4xSRAM 16Кx64бит 2xТС, АЛУ, Вект.сопр. |
| Энергопотребление | 2,7 Вт | – | 1,6 Вт | 4,2 Вт | 1,2 Вт |
| Интерфейсы | DDR1, UART, SPI, USB2.0, GPIO, JTAG | HDMI,NAND, 2xSPI, 3xI2C, 3xUART, DDR2, SDRAM, I2S, S/PDIF DVB-CI, Ethernet100M, USB 2.0 , 82xGPIO | 2x64-разр. SRAM/DRAM, 2xTMS320C4xI/O 20 Мбайт/с, 2x64-разр. I/O 320 Мбайт/с | SRAM - SSRAM, SDRAM 800 Мбайт/с 36xGPIO | LMI, GMI 64р. 130 МГц, CP0, CP1 160 Мбайт/с 8xGPIO, JTAG, 2xD MA |
| Производительность | | | 40 MIPS | | 300 MIPS |

*Как видно из таблицы, все микросхемы имеют в сотни раз большее чем у Atmel SAM D20 энергопотребление и обладают высокой производительностью, широким набором высокоскоростных интерфейсов, встроенной памятью, АЦП/ЦАП и дополнительными сопроцессорами. К SAM D20 по набору интерфейсов и периферии наиболее близка микросхема 1879ВЯ1Я, поскольку остальные чипы имеют значительную избыточность.*

АО «МЦСТ» [14] выпускает микропроцессоры семейства «Эльбрус» на основе архитектуры VLIW и SPARC (таблица 4).

Только микросхема 1891ВМ3 оснащена высокоскоростными интерфейсами: PCI 264 МБ/с, Ethernet 100 Мб/с, SCSI-2 10 МБ/с, RS-232, 115 Кбит/с, EBus 10 МБ/с. *Как видно из таблицы, все микропроцессоры имеют высочайшую производительность, а следовательно, высокое энергопотребление, и не оснащены интерфейсами SPI, I2C, I2S и т.п., а также*

*АЦП, ЦАП. Поэтому ни одна микросхема 1891ВМх не может импортозаместить Atmel SAM D20.*

Таблица 4 – Характеристики микросхем 1891ВМх компании АО «МЦСТ»

| **Микросхема/ хар-ка** | **х8Я** | **х9Я** | **х6Я** | **х7Я** | **х5Я** | **х3** | **х4Я** | **х2** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Архитектура | VLIW | VLIW | SPARC V9 | VLIW+ ElCore9 | VLIW | SPARC V8 | VLIW | SPARC V8 |
| $F_{такт}$, ГГц | 0,8 | 0,3 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,3 | 0,5 |
| Ядер | 4 | 2 | 4 | 2+4 | 1 | 2 | 1 | 1 |
| Произв, Гфлопс | 50 | 9.6 | 16 | 16 | 8 | 1 | 4,8 | 0,5 |
| Кэш 1 ур. | 64+128 КБ | 64+64 КБ | 32+16 Кб | 64+64 Кб | 64+64 Кб | 32+16 Кб | 64+64 Кб | 32+16 Кб |
| Кэш 2 ур. | 8 МБ | 2 МБ | 2 МБ | 2 МБ | 2 МБ | 512 Кб | 256 Кб | 4 МБ |
| Организация ОЗУ | 3xDDR3-1600 ECC - 38,4ГБ/с | 2xDDR2-533 8,5ГБ/с | DDR2-800 6,4ГБ/с | DDR2-800 12,8 ГБ/с | 2xDDR2-500 ECC - 8ГБ/с | DDR 2,6 ГБ/с | DDR2 ECC 4.8ГБ/с | MBus 0,8ГБ/с |
| Межпроц. обмен | 3x12 ГБ/с, дупл. | 3x4 ГБ/с | 3x4 ГБ/с, дупл. | 3x4 ГБ/с, дупл. | 3x4 ГБ/с, дупл. | 1x2,6 ГБ/с | – | – |
| Remote DMA | 1x4ГБ/с дупл. | 2x2ГБ/с | 1x2ГБ/с дупл. | 2x4ГБ/с | 1x2ГБ/с дупл. | – | – | – |
| Техн, нм | 65 | 90 | 90 | 90 | 90 | 130 | 130 | 130 |
| Корпус | HFCBGA1600 | HFCBGA1296 | HFCBGA1156 | HFCBGA1296 | HFCBGA1156 | HFCBGA900 | HFCBGA900 | BGA 376 |
| Энерг. | 45 Вт | 20 Вт | 15 Вт | 25 Вт | 20 Вт | 5 Вт | 6 Вт | 1 Вт |

Компания «ИДМ-ПЛЮС» [15] выпускает семейство 16 битных МК ТФ-16 по технологии 0,35 мкм с регистрово-стековой архитектурой с совмещенной памятью программ и данных, ориентированной на программирование на языке Forth. ТФ-16А с частотой 50 МГц, энергопотреблением 1 (мА/МГц)х3,3 В, в корпусе LQFP 144 (22 х 21 мм), MROM 2КБ, SRAM 32 КБ, Ext RAM (ROM) до 4 МБ, PLL 2-100 МГц, 4xUART, GPIO 3x16bit, Nand-Flash, 10 бит АЦП 8 кан. Ядро имеет 16 бит АЛУ, регистры, аккумуляторы, счетчики команд. ТФ-16В 16-бит RISC с энергопотреблением до 60 мАх3,3 В при 50 МГц или 1 мА/МГц, корпус - H18.64-18, MROM 128 КБ, SRAM 8 КБ, PLL 4-200 МГц, 2xUART, 2x16 бит&PWM, 1x3PWM цепь, GPIO 2x16 bit, производительность до 25 MIPS при 50 MHz, адреса 4 MB, таймеры; 10 бит АЦП и 4хЦАП 10 бит, датчик температуры. Энергосберегающий ТФ-16BS – КШЫС, 16 КБ ОЗУ; 16-бит АЦП 4 кан; масочное ПЗУ К1894ВГ1Т 1Кх16, SRAM 32Кх16, генератор 1-20 МГц; ФАПЧ. MROM 1 КБ, SRAM 16 КБ, UART, SPI, JTAG, RTC, GPIO 1x16bit, энергопотребление 300 мкА х 3,3 В при 10 МГц, 1 мкА в спящем режиме, корпус - RHB 32 (7х7 мм), адресная память 17 КБ, 16xGPIO, таймеры, управление питанием, датчик температуры. *За исключением архитектуры и процессорного ядра, по остальным параметрам все микросхемы семейства ТФ-16 схожи с Atmel SAM D20. Наиболее близким импортозамещающим аналогом является МК ТФ-16BS, энергопотребление которого составляет 1 мВт, такого же порядка как у SAM D20.*

ОАО «Мультиклет» [16] занимается разработкой, производством и выводом на рынок отказоустойчивых DSP-процессоров, используемых как процессоры общего назначения, спроектированных на базе MIMD-архитектуры, получившей название «мультиклеточной», и сделанные по технологии 0,18 мкм. MCp0411100101 в корпусе LBGA-256 (14x14 мм) для задач управления и ЦОС, сочетает в минимальное энергопотребление (до 1,08 Вт) при высокой производительности. Ядро MCc04111 (4 клетки), разрядность 32/64 бит, частота 100 МГц, память данных 128 Кб, программ 128 Кб. MCp042R100102 в корпусе является процессором общего назначения с: динамической реконфигурацией JTAG, LQFP-256 (28x28 мм), ядро MCp042R1 (4 клетки), разрядностью 32/64 бит, частота 100 МГц, PLL, память данных 256 Кб, программ 256 Кб, энергопотреблением до 1,05 Вт, IEEE – 754 FPU, ЦАП 100 Мвыб/с 12 бит, АЦП 2x4 канала: 48 Квыб/с, 16 бит. Оба процессора имеют производительность 24 MFLOPS/МГц и оснащены интерфейсами: USB 1.1., 4xUART, I2C, 3xSPI, I2S, 4 кан PWM, 104xGPIO, Ethernet. *Несмотря на отличие в архитектуре, по остальным параметрам, эти процессоры схожи с Atmel SAM D20, а также имеют относительно низкое энергопотребление, и MCp042R100102 можно рассматривать как аналог.*

ООО «КМ211» [17] выпускает по технологии 90 нм 32-разрядный RISC микропроцессор КВАРК частотой 600 МГц общего назначения для встраиваемых применений, имеющий: MMU и кэш-память; ЦСП; FPU; спящий режим с низким потреблением (1,1 DMIPS/МГц); портированный FreeRTOS, Linux 2.6; GPIO, счётчики, ШИМ, CRC-калькуляторы, NAND, compact-flash, Ethernet, USART, I2C, I2S, SPI, LCD-контроллер JTAG; кодеки MPEG2, MPEG4, MP3. Быстродействие-энергопотребление на ARM9/ARM11 8,5 DMIPS/мВт, спящий режим с низким потреблением, Интерфейсы для смарт-карты и ID: ISO7816, ISO14443. *Микропроцессор КВАРК имеет превосходство в интерфейсах и сопроцессорах, и сопоставимое с Atmel SAM D20 соотношение производительность-энергопотребление, однако отсутствие в нем АЦП и ЦАП не дает возможность быть ему импортозамещающим аналогом.*

ЗАО «ПКК «Миландр» [18] выпускает семейства 8-разрядных 1886ВЕх (ядро PIC17), 32-разрядных 1986ВЕ4х (ARM Cortex-M0), 1986ВЕ9х (ARM Cortex-M3, аналог STM32F103x) и двухъядерных 1901ВЦ1Т с 16-битным DSP микроконтроллеров. Их характеристики представлены в таблице 5.

*Как видно из таблицы 5, микросхемы 1986ВЕ4У, К1986ВЕ4У компании «Миландр» очень схожи с Atmel SAMD 20, но максимальное подходящее для импортозамещения сходство (по ядру, интерфейсам, производительности, АЦП и пр.) имеет 1986ВЕ4У, энергопотребление которого составляет 60 мВт.*

Таблица 5 – Характеристики МК компании ЗАО «ПКК «Миландр»

| МК | Корпус | Память, КБайт | $f_c$, МГц | ТС | АЦП | Интерфейсы |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1886ВЕ1У | Н18.64-1В | MaskROM, 64 | 33 | 4 | 10р12к | 2xUART, SPI, I2C |
| 1886ВЕ2У | | Flash, 64 | | 4 | 10р12к | 2xUART, SPI, I2C |
| 1886ВЕ3У | Н16.48-1В | | | 1 | – | UART, 2xUSB, NAND |
| 1886ВЕ4У | | | | 1 | – | UART, SPI, 4xUSB, NAND |
| 1886ВЕ5БУ | Н14.42-1В | EEPROM, 8 | 25 | 3 | 10р8к | USART, CAN |
| 1886ВЕ61У, 1886ВЕ61У1 | Н16.48-1В, 5142.48-А | EEPROM, 8 | 24 | 3 | 12р8к | 2xUSART |
| 1886ВЕ71У | Н09.28-1В | EEPROM, 4 | 10 | 1 | – | USART |
| 1986ВЕ4У | Н18.64-1В | Flash,128 | 36 | 2 | 24р8к | 36xGPIO, 2xUART, SPI, DMA |
| 1901ВЦ1Т | 4229.132-3 | Flash,128 | 100 | – | 24р16к | 96xGPIO, UART, SPI, I2C, SDIO, NAND |
| 1986ВЕ91Т, 1986ВЕ94Т | 4229.132-3 | Flash,128 | 80 | 3 | 2х16к | 96xGPIO, 2xUART, 2xSPI, I2C, 2xCAN, USB |
| 1986ВЕ92У, К1986ВЕ92QI | Н18.64-1В | | | 3 | 2х8к | 43xGPIO, 2xUART, 2xSPI, I2C, 2xCAN, USB |
| 1986ВЕ93У | Н16.48-1В | | | 3 | 2х4к | 30xGPIO, 2xUART, SPI, 2xCAN, USB |

Белорусская фирма NTLab [19] выпускает по технологии 90 нм двухъядерный микроконтроллер NT1004 и 32-битный микроконтроллер NT1018 в корпусе BGA144. Каждое 32-битное ядро NT1004 включает: RISC процессор, векторный сопроцессор, 16 Кбайт кэш, 32 Кбайт SRAM, 8-канальный DMA, USB 2.0, 2xUART, 2xSPI, I2C, LCD контроллер, многоканальный контроллер внешней памяти, сопроцессор DES/TDES, AES128/AES192/AES256 шифрования. NT1018 имеет 32 разрядное RISC ядро, FPU, 24 Кб кэш, MMU, 128 Кб SRAM, 8-канальный DMA, AC97 и I2S, 2xUART, 2xSPI, I2C, 3 таймера, часы реального времени, контроллер прерываний, LCD контроллер, интерфейс External NAND, 16-битный ЦАП, интерфейс отладки. *Несмотря на отсутствие сведений по производительности и энергопотреблению, по набору основных функций и интерфейсов, NT1018 наиболее приближен к SAM D20.*

ОАО «НИИЭТ» [20] выпускает 8-ми (Н1830ВЕ51, 1882ВЕ53У, 1882ВМ1Т, 1887ВЕ4У, 1887ВЕ7Т) и 16-ти (1874ВЕ36, 1874ВЕ76Т, 1874ВЕ86Т, 1874ВЕ66Т, 1887ВЕ3Т) разрядные микроконтроллеры, многие из которых являются аналогами зарубежных микросхем, и 32-разрядный К1921ВК01Т:

– Н1830ВЕ51 – аналог 83С51 фирмы Intel, с частотой 12 МГц, ОЗУ 128х8, ПЗУ 4Кх8, 2х16-разрядных таймера, UART, энергопотребление 132 мВт, корпус Н16.48-2В; 1882ВЕ53У – аналог AT89S8253 фирмы Atmel, 24 МГц, ОЗУ 256х8, ПЗУ 12Кх8, память данных EEPROM 2Кх8, 3х16-разрядных таймера, UART, SPI, WDT, корпус Н16.48-2В; 1882ВМ1Т с системой команд и архитектурой MCS-51, 24 МГц, память программ 32 Кбайт, память данных EEPROM 4 Кбайт,

кодирование по ГОСТ 28147-89, MDU, UART, SPI, MIL-STD-1553, I2C, LIN, корпус 4203.64-1; 1887ВЕ4У – аналог ATmega8535 фирмы Atmel, RISC, 8 МГц, ПЗУ 8Кх8 флэш, ЭСППЗУ 1Кх8, ОЗУ 512х8, UART, SPI, АЦП (8 каналов, 8/10 бит), WDT, аналоговый компаратор, RC генератор, корпус Н16.48-2В; 1887ВЕ7Т – аналог ATmega 128, AVR, 8 МГц, память программ 128 Кб, данных 4 Кб, ОЗУ 4 Кб, 2xUART, SPI, TWI, 53xGPIO, АЦП, аналоговый компаратор, WDT, JTAG, корпус 4203.64-2, питание 5В, 6 режимов пониженного энергопотребления; сброс при подаче питания и программируемая схема сброса при снижении напряжения питания;

– 1874ВЕ36 – аналог 83С196КВ-12 фирмы Intel, 20 МГц, ОЗУ 232х8, ПЗУ 8Кх8, 2х16-разрядных таймера, АЦП, ШИМ, энергопотребление 300 мВт, корпус 4235.88-1; 1874ВЕ76Т – аналог TN80C196KC-20 фирмы Intel, 20 МГц, ОЗУ 488х8, ПЗУ 16Кх8, АЦП, 3хШИМ, PTS, HSIO, UART, WD, корпус Т4235.88-1; 1874ВЕ86Т и 1874ВЕ66Т – аналоги 80С196МС и 87С196MD фирмы Intel (для управления двигателями), 16 МГц, ОЗУ 488х8, ПЗУ 16Кх8 типа OTP ROM, 2 16-разрядных таймера, АЦП, ШИМ, EPA, PTS, 3-фазный генератор, корпус 4235.88-1; 1887ВЕ3Т на базе RISC ядра C166SV1.2, 40 МГц, ПЗУ 256 Кбайт, ОЗУ 15 Кбайт, АЦП (16 каналов, 8/10 бит), 2xCAPCOM, ШИМ, 2xUSART, 2xSPI, I2C, CAN, WDT, OCDS, JTAG, корпус 4247.144-1.
– К1921ВК01Т на ядре ARM Cortex-M4F с поддержкой команд MAC, SIMD, FPU, производительностью 125 MIPS имеет: FLASH 1Мб программ и 64Кб данных, 192Кб RAM; контроллеры SRAM, PROM, NOR Flash, DMA; таймеры и RTC; ФАПЧ, 12хАЦП 2к12р, 18хШИМ, 6xCAP; интерфейсы 2xCAN, 2xI2C, 2x eQEP, 4xSPI, 4xUART, USB 2.0, Ethernet 100 Мбит/с, JTAG, 88xGPIO.

*Все эти микроконтроллеры по набору интерфейсов, производительности, и энергопотреблению схожи и, немного уступают Atmel SAM D20. По критерию наличия АЦП аналогами являются 1887ВЕ4У, 1887ВЕ7Т, 1874ВЕ36, 1874ВЕ76Т, 1874ВЕ86Т, 1874ВЕ66Т и 1887ВЕ3Т. Из них самый близкий 1887ВЕ7Т, но в случае меньшего набора интерфейсов можно рассматривать 1887ВЕ4У. Аналогичным по архитектуре К1921ВК01Т можно провести полноценное импортозамещение.*

## Выводы

Несмотря на широчайший спектр возможностей и преимуществ, предоставляемых микроконтроллерами семейства SAM D20 компании Atmel, таких как набор интерфейсов, АЦП, ЦАП, энергосбережение и пр., актуальной является задача его импортозамещения.

На сегодняшний день на российском рынке представлено более 10 отечественных компаний разработчиков-производителей современных микроконтроллеров и микропроцессоров. Проведенный анализ показал, что полноценного аналога среди российских микросхем не существует. Все

отечественные микросхемы отличаются в десятки и сотни раз большим, чем у SAM D20 энергопотреблением. Наиболее близкими по характеристикам являются следующие микросхемы:

– К5512БП1Ф компании НИИМА «Прогресс»;
– 1879ВЯ1Я компании НТЦ «Модуль»;
– TF-16BS фаблесс компании «ИДМ-ПЛЮС»;
– MCp042R100102 компании ОАО «Мультиклет»;
– 1986ВЕ4У компании «Миландр»;
– NT1018 фирмы «NTLab»;
– К1921ВК01Т компании ОАО «НИИЭТ».

Ими вполне можно заменить SAM D20 в случае некоторых ограничений в значениях параметров, определяемых техническими требованиями к разработке. Самым близким аналогом является микросхема К1921ВК01Т, которая по своим характеристикам не уступает иностранным микроконтроллерам данного класса, а с учетом отечественного модуля разработчика MBS-К1921ВК01Т и графической среды программирования MexBIOS™ Development Studio, позволит существенно ускорить создание программного обеспечения, что обеспечит импортозамещение электронных компонентов встраиваемых систем управления. Также, по критериям схожести набора интерфейсов и низкому энергопотреблению интересен МК TF-16BS регистрово-стековой архитектуры. Следует заметить, в системах, решающих задачи определения местоположения от ГНС, целесообразно использовать микросхему VIP-1 компании «ЭЛВИС».

## Литература

1. Импортозамещение в России // Новости России [Электронный ресурс] – URL: http://newsruss.ru/doc/index.php/Импортозамещение_в_России (дата обращения: 25.02.2016).

2. Технологическое отставание России по микропроцессорам на основании технологического процесса в производстве // savepearlharbor [Электронный ресурс] – URL: http://savepearlharbor.com/?p=257695 (дата обращения: 25.02.2016).

3. Atmel SMART SAM D20. DATASHEET // Atmel-42129N–SAM-D20_datasheet–01/2015.

4. Atmel SAM D Family. ARM Cortex-M0+ based Flash Microcontrollers. 2014. – 8 p.

5. Микроконтроллеры SAM D на базе ARM Cortex-M0+ // Atmel [Электронный ресурс] – URL: http://www.atmel.com/ru/ru/products/microcontrollers/arm/sam-d.aspx (дата обращения: 25.02.2016).

6. Сайт компании «Байкал Электроникс» // Байкал Электроникс [Электронный ресурс] – URL: http://www.baikalelectronics.ru/ (дата обращения: 25.02.2016).

7. Сайт компании «ЭЛВИС» // ЭЛВИС [Электронный ресурс] – URL: http://элвис-неотек.рф/ (дата обращения: 25.02.2016).

8. Микросхемы НИИСИ РАН // НИИСИ РАН [Электронный ресурс] – URL: http://www.pcweek.ru/gover/it-independence/materials/13-bobkov.pdf (дата обращения: 25.02.2016).

9. Продукты компании Юникор Микросистемс // Юникор Микросистемс [Электронный ресурс] – URL: http://www.interstron.ru/company_prod.html (дата обращения: 25.02.2016).

10. Характеристики микросхем компании Юникор Микросистемс // Kilouma [Электронный ресурс] – URL: http://kilouma.ru/safia/fgup-niima-progress-g-moskva/stranica-11.html (дата обращения: 25.02.2016).

11. ОАО «Ангстрем» // ОАО «Ангстрем» [Электронный ресурс] – URL: http://www.angstrem.ru (дата обращения: 25.02.2016).

12. Микроконтроллеры АО «НИИМА «ПРОГРЕСС» // АО «НИИМА «ПРОГРЕСС» [Электронный ресурс] – URL: http://www.mri-progress.ru/products/bis-i-sbis/sbis-snk/ (дата обращения: 25.02.2016).

13. Микросхемы компании НТЦ «Модуль» // НТЦ «Модуль» [Электронный ресурс] – URL: http://www.module.ru/catalog/micro/ (дата обращения: 25.02.2016).

14. Микросхемы компании АО «МЦСТ» // АО «МЦСТ» [Электронный ресурс] – URL: http://www.mcst.ru/mikroprocessory-i-sbis?dyn=1&type[]=t5&page=1 (дата обращения: 25.02.2016).

15. Микроконтроллеры компании «ИДМ ПЛЮС» // «ИДМ ПЛЮС» [Электронный ресурс] – URL: (http://www.idm-plus.ru/ru/16bit.html (дата обращения: 25.02.2016)

16. Микропроцессоры компании ОАО «Мультиклет» // ОАО «Мультиклет» [Электронный ресурс] – URL: http://www.multiclet.com/index.php/ru/products/mult-procces (дата обращения: 25.02.2016).

17. Микропроцессоры семейства КВАРК компании ООО «КМ211» // ООО «КМ211» [Электронный ресурс] – URL: http://www.km211.ru/ru/kvarc-32bit (дата обращения: 25.02.2016).

18. Микроконтроллеры компании ЗАО «ПКК «Миландр» // ЗАО «ПКК «Миландр» [Электронный ресурс] – URL: http://www.milandr.ru/index.php?page=produktsiya (дата обращения: 25.02.2016).

19. Микроконтроллеры компании NTLab // NTLab [Электронный ресурс] – URL: http://www.ntlab.com/portfolio/category:v:MCU+%26+DSP.htm (дата обращения: 25.02.2016).

20. Микроконтроллеры компании ОАО «НИИЭТ» // ОАО «НИИЭТ» [Электронный ресурс] – URL: http://www.niiet.ru/chips (дата обращения: 25.02.2016).

## References

1. Import substitution in Russia. *Novosti Rossii* [Online Resource]. Available at: http://newsruss.ru/doc/index.php/Импортозамещение_в_России (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

2. Maintenance backlog of Russia on microprocessors based on the technological process in the production. *Savepearlharbor* [Online Resource]. Available at: http://savepearlharbor.com/?p=257695 (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

3. Atmel SMART SAM D20. DATASHEET // Atmel-42129N–SAM-D20_datasheet–01/2015.

4. Atmel SAM D Family. ARM Cortex-M0+ based Flash Microcontrollers. 2014. – 8 p.

5. SAM D microcontrollers based ARM Cortex-M0+. *Atmel* [Online Resource]. Available at: http://www.atmel.com/ru/ru/products/microcontrollers/arm/sam-d.aspx (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

6. The site of the company «Baikal Electronics». *Baikal Electronics* [Online Resource]. Available at: http://www.baikalelectronics.ru/ (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

7. The site of the company «ELVEES». *JSC Research and Development Center «ELVEES»* [Online Resource]. Available at: http://multicore.ru/ (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

8. Chips of Scientific Research Institute of System Analysis. *Scientific Research Institute of System Analysis* [Online Resource]. Available at: http://www.pcweek.ru/gover/it-independence/materials/13-bobkov.pdf (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

9. Products company UNICORE MICROSYSTEMS. *UNICORE MICROSYSTEMS* [Online Resource]. Available at: http://www.interstron.ru/company_prod.html (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

10. Features chips company UNICORE MICROSYSTEMS. *Kilouma* [Online Resource]. Available at: http://kilouma.ru/safia/fgup-niima-progress-g-moskva/stranica-11.html (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

11. JSC «Angstrem». *JSC «Angstrem»* [Online Resource]. Available at: http://www.angstrem.ru (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

12. Microcontrollers JSC NIIMA PROGRESS. *JSC NIIMA PROGRESS* [Online Resource]. Available at: http://www.mri-progress.ru/products/bis-i-sbis/sbis-snk/ (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

13. Chips company RC «Module». *RC «Module»* [Online Resource]. Available at: http://www.module.ru/catalog/micro/ (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

14. Chips company JSC «MCST». *JSC «MCST»* [Online Resource]. Available at: http://www.mcst.ru/mikroprocessory-i-sbis?dyn=1&type[]=t5&page=1 (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

15. Microcontrollers «IDM Plus». *«IDM Plus»* [Online Resource]. Available at: (http://www.idm-plus.ru/ru/16bit.html (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

16. Microprocessors company JSC «Multiclet». *JSC «Multiclet»* [Online Resource]. Available at: http://www.multiclet.com/index.php/ru/products/mult-procces (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

17. Microprocessors company «KM211». *KM211* [Online Resource]. Available at: http://www.km211.ru/ru/kvarc-32bit (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

18. Microcontrollers JSC «ICC Milandr». *JSC «ICC Milandr»* [Online Resource]. Available at: http://www.milandr.ru/index.php?page=produktsiya (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

19. Microcontrollers NTLab. *NTLab* [Online Resource]. Available at: http://www.ntlab.com/portfolio/category:v:MCU+%26+DSP.htm (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

20. Microcontrollers JSC «NIIET» *JSC «NIIET»* [Online Resource]. Available at: http://www.niiet.ru/chips (accessed: 25 February 2016) (in Russian).

**Статья поступила 29 февраля 2016 г.**

## Информация об авторах

*Аминев Дмитрий Андреевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры ИУ-4 "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры". Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: системы и сети передачи данных; радиоэлектронная аппаратура. E–mail: aminev.d.a@ya.ru

*Охломенко Илья Вячеславович* – студент 4-го курса кафедры ИУ-4 "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры". Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: моделирование радиотехнических систем; проектирование цифровой аппаратуры. E–mail: ilya.okhlomenko@gmail.com

*Никитенко Мария Владимировна* – студент 4-го курса кафедры ИУ-4 "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры". Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: моделирование радиотехнических систем; проектирование цифровой аппаратуры. E–mail: nnikitenko.mary@yandex.ru

*Сачкова Наталья Александровна* – студент 4-го курса кафедры ИУ-4 "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры". Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: моделирование радиотехнических систем. E–mail: sachkova.natalia.a@gmail.com

*Гусева Полина Александровна* – студент 4-го курса кафедры ИУ-4 "Проектирование и технология производства электронной аппаратуры". Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана. Область научных интересов: моделирование радиотехнических систем; сбор и обработка информации. E–mail: appolinaria.94@mail.ru

Адрес: 105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1

# Investigation of the Possibility of Import Substitution Microcontroller Atmel SAM D20 Domestic Chips

D. A. Aminev, I. V. Ohlomenko, M. V. Nikitenko,
N. A. Sachkova, P. A. Guseva

***Formulation of the problem:*** *as a result of contemporary geopolitics in Russia imposed sanctions on imports of various high-tech solutions of western production. Production of microcontrollers and processors have not been established in the modern world level ever since the collapse of the USSR. As is known, the processor - the main part of the computer hardware or a programmable logic controller, performing machine instructions, and therefore today without it can not do any one high-tech device. Therefore, the relevance of this work is the task of finding domestic counterparts overseas microcontrollers and chip import substitution to the realities of sanctions.* ***The aim is*** *finding domestic counterparts processor family of the Atmel SAM D20, a comparison of their characteristics, as well as consideration of the evolution of these decisions and their future. Formulate proposals for import substitution.* ***Result:*** *The actual replacement of imports by domestic processors analogues produced at a given time, and planned for release in the near future. The characteristics of processors family SAM D20 the Atmel company, as well as the different technologies and peripheral output used in this family. The characteristics of the families of domestic microcontrollers and microprocessors, with the same architecture, features and interfaces, and other parameters of the following manufacturers: "Baikal Electronics", Group of companies "ELVIS" NIISI RAS Unicore Microsystems, Inc. "Angstrom" Nyima "Progress" STC "module", JSC "MCST", "IDM-PLUS ", JSC "Multiclet", "KM211 Ltd.", JSC "ICC "Milandr", NTLab, JSC "NIIET". A comparison of the characteristics of their family of SAM D20 and the integrated set of performance in different conditions and objectives conclusions on the possibility of its domestic import specific chips.*

***Keywords:*** *a microcontroller, a microprocessor chip, import substitution, domestic processors, comparison features, interface, performance.*

## Information about Authors

*Dmitrij Andreevich Aminev* – Ph.D. of Engineering Sciences. Associate Professor of the Department of "Design and technology of electronic equipment". Bauman Moscow State Technical University. Field of research: systems and data networks, electronic instruments. E–mail: aminev.d.a@ya.ru

*Ilya Vyacheslavovich Ohlomenko* – Student of the Department of "Design and technology of electronic equipment". Bauman Moscow State Technical University. Field of research: modeling of radio systems; digital hardware design. E–mail: ilya.okhlomenko@gmail.com

*Mariya Vladimirovna Nikitenko* – Student of the Department of "Design and technology of electronic equipment". Bauman Moscow State Technical University. Field of research: modeling of radio systems; digital hardware design. E–mail: nnikitenko.mary@yandex.ru

*Natalya Aleksandrovna Sachkova* – Student of the Department of "Design and technology of electronic equipment". Bauman Moscow State Technical University. Field of research: modeling of radio systems; collecting and processing information. E–mail: sachkova.natalia.a@gmail.com

*Polina Aleksandrovna Guseva* – Student of the Department of "Design and technology of electronic equipment". Bauman Moscow State Technical University.

Field of research: modeling of radio systems; collecting and processing information.
E–mail: appolinaria.94@mail.ru
Address: Russia, 105005, Moscow, ul. Baumanskaya 2-ya, 5.

УДК 621.391

# Модель учета ценности и старения информации при оценивании эффективности функционирования систем информационного обеспечения

Парамонов И. Ю.

***Постановка задачи:*** *увеличение количества информационных потоков усиливает проблемы, связанные с необходимостью совершенствования систем информационного обеспечения. При принятии информационных и управленческих решений необходимо учитывать качество поступающей информации. Известные теории не в полной мере учитывают семантику и прагматику информации, а также влияние качества информации на достижение целей функционирования информационных систем.* ***Целью работы*** *является разработка модели, которая позволит учесть влияние качества информации на эффективность функционирования систем.* ***Новизна:*** *в отличие от известных представленная модель учитывает ценность информации, а также влияние старения информации на эффективность функционирования систем информационного обеспечения.* ***Используемые методы:*** *решение проблемы повышения эффективности информационного обеспечения возможно за счет развития теории информации, кибернетики и учета семантики и прагматики информации.* ***Результат:*** *использование предложенной модели позволяет получить оценки «реальной» скорости передачи информации и количества и информационной работы.* ***Практическая значимость:*** *представленная модель может быть использована при разработке инженерных методик оценивания качества и эффективности функционирования систем информационного обеспечения.*

***Ключевые слова:*** *информационное обеспечение, информация, семантика, прагматика, ценность, полезность, старение, информационная работа.*

## Введение

В условиях лавинообразного увеличения количества информации необходимо учитывать влияние информации на эффективность функционирования систем, использующих данную информацию при принятии решений.

Современные теории анализа и синтеза информационных систем практически не учитывают вопросы информационного взаимодействия источников и получателей информации, а также промежуточных звеньев. Современная теория информации учитывает только синтаксический уровень информации (количество информации). Вопросы «информационного» согласования источника и получателя информации, а также учет «реального» времени в настоящее время остаются мало изученными [1, 2, 3, 4, 7].

В ряде работ [1, 3, 4] обращается внимание на необходимость разработки новой теории информации, которая рассматривала бы информацию не только на синтаксическом уровне, но и на семантическом, и на прагматическом уровнях, а также учитывала бы динамические свойства информации (накопление, старение и т.д.). В условиях информационного «взрыва» требуется учет и количества, а, самое главное, и качества информации.

При анализе влияния качества информации на качество принимаемых решений необходимо рассматривать и семантику, и прагматику обрабатываемой информации [1, 6]. На семантическом уровне необходимо учитывать возможность системы управления (лица, принимающего решение)

использовать поступающую информацию, т.е. соотношение между энтропией источника и тезаурусом получателя. На прагматическом уровне необходимо учитывать ценность, полезность, полноту, достаточность, новизну информации. Количество ценной (полезной) информации и её качество подвержены изменениям под влиянием различных дестабилизирующих факторов, т.е. информация стареет, что также необходимо учитывать.

## Модель учета ценности информации

В линиях связи скорость передачи информации может быть значительно меньше пропускной способности из-за воздействия дестабилизирующих факторов. Из теории информации известно, что скорость передачи информации определяется выражением [5]:

$$V = \Delta f \log_2\left(1 + \frac{P_c}{P_ш}\right), \quad (1)$$

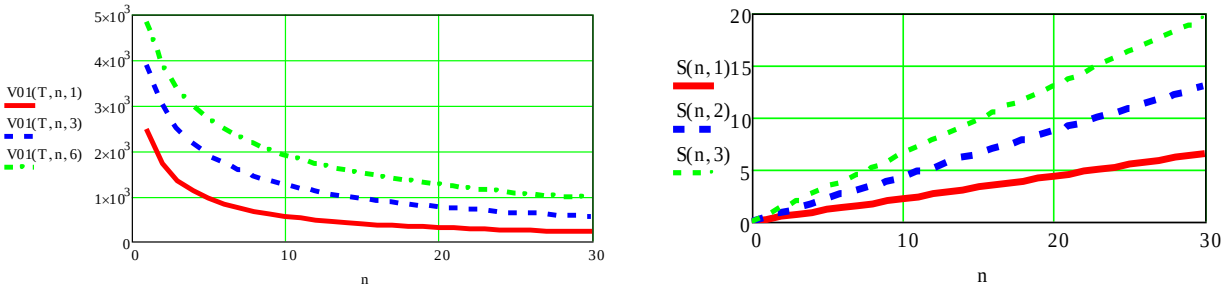
где $\Delta f$ – ширина полосы частот; $P_c$, $P_ш$ – мощность сигнала и шума соответственно.

Введение избыточности для обеспечения восстановления в приёмнике информации с заданным качеством приводит к снижению скорости передачи при фиксированных частотно-энергетических параметрах канала связи. Для систем с накоплением количественно величина избыточности может оцениваться выражениями [6]:

$$nh^2 = 4{,}6S, \quad (2)$$

$$S = \lg \frac{1}{P_{ош}}, \quad (3)$$

где $n$ – число повторений; $h^2$ – отношение сигнал/шум; $S$ – ценность информации (по А.А. Харкевичу).




а) б)

Рис. 1. Зависимость эффективной скорости передачи информации (а) и ценности информации (б) от числа повторов

Увеличение количества повторений $n$ позволяет с одной стороны повысить «ценность» информации $S$, однако при этом увеличивается и время

передачи, т.е. снижается «эффективная» скорость передачи информации $V_{01}$ (см. рис. 1), которая определяется выражением:

$$V_{01} = \Delta f_э \log_2\left(1 + \frac{P_c}{P_ш}\right), \quad (4)$$

где $\Delta f_э$ – эквивалентная ширина полосы частот, которая учитывает увеличение времени передачи при заданной «ценности» информации $S$.

## Модель учета старения информации

С течением времени ценность (полезность) информации уменьшается, т.е. она стареет. Ценность (полезность) информации определяется целями и задачами, стоящими перед информационной системой, которая использует данную информацию для выработки решений. Старение информации связано не с самой информацией, а с появлением более новой информации. Информация имеет свой жизненный цикл, длительность которого ограничена временем «жизни». На протяжении жизненного цикла информация стареет, при этом ценность информации уменьшается.

В информационном потоке можно условно выделить две составляющие: «стабильная» и «динамическая», динамические характеристики которых различны. Скорость старения этих двух частей различна. В качестве модели старения информации примем известную модель Бартона–Кеблера [7], которая в более общем виде может быть представлена выражением:

$$m(t) = 1 - ae^{-ct} - be^{-dt}. \quad (5)$$

Здесь $m(t)$ – часть полезной информации в общем информационном потоке через время $t$; $ae^{-ct}$, $be^{-ct}$ – слагаемые, описывающие старение «стабильной» и «динамической» частей информационного потока; $a$, $b$, $c$, $d$ – коэффициенты, учитывающие соотношение «стабильной» и «динамической» частей, а также время «жизни» информации.

Используя выражения (1)–(5), можно оценить эффект снижения «эффективной» скорости передачи информации, вызванное эффектом старения. На рис. 2 показаны зависимости скорости передачи информации без учета старения $V_{01}$ и с учётом старения информации $V$.

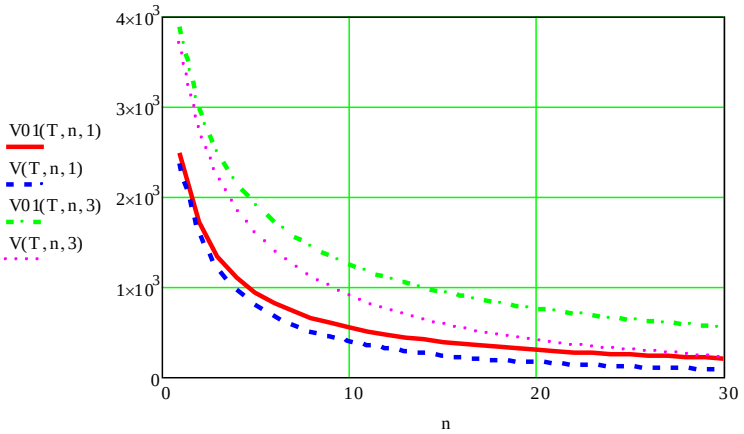



Рис. 2. Зависимость эффективной скорости передачи информации от числа повторов с учетом старения информации

Информация имеет свойство накапливаться. Для оценивания эффективности функционирования информационных систем с учётом накопления информации можно использовать подход, изложенный в работах [3, 8]. В качестве характеристики информационной системы предлагается использовать величину информационной работы, под которой понимается количество информации полученной на выходе системы за время ее функционирования. Количество информационной работы $A_I$ является интегральной характеристикой и определяется выражением [3]:

$$A_I = VT, \tag{6}$$

где $V$ – скорость передачи информации; $T$ – время функционирования.

В процессе функционирования системы информационного обеспечения количество информационной работы $A_I$ увеличивается со временем. При оценивании накопленной информации необходимо учитывать потери связанные со старением информации. Информация стареет из-за конечности скорости передачи информации и конечности допустимого времени для принятия решения на основе полученной информации. Скорость (время) передачи информации может значительно уменьшаться (увеличиваться) из-за воздействия помех. В условиях воздействия дестабилизирующих факторов необходимо вводить избыточность (частотную, временную, энергетическую и т.д.) для уменьшения негативных последствий.

На рис. 3 приведены зависимости количества информационной работы для «идеальной» системы информационного обеспечения $A_I$, с учетом повторов $A_{I1}$ и с учётом старения информации $A_{I2}$.

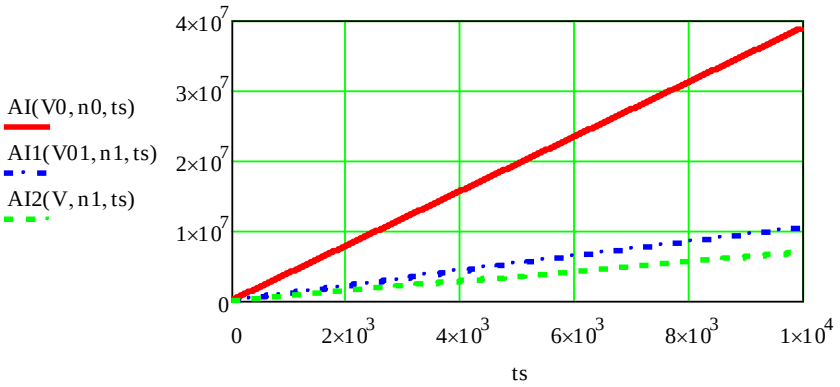



Рис. 3. Зависимость информационной работы от времени функционирования системы, числа повторов и старения информации

Конечность времени ценности (полезности) информации для принятия информационных и управленческих решений определяет время жизни информации и скорость старения информации. Старение информации приводит к снижению «эффективной» скорости передачи информации и к снижению количества накопленной информации. Графические зависимости, представленные на рис. 1–3, иллюстрируют эффект снижения «эффективной» скорости передачи информации при увеличении времени передачи.

Скорость старения информации зависит от целей функционирования информационной системы, решаемых задач и от скорости протекания информационных процессов. В условиях быстро изменяющейся обстановки и высокой ценности (полезности) передаваемой информации для принятия своевременных и обоснованных решений необходимо учитывать снижение ценности (полезности) информации, а также связанные с этим информационные риски (ущерб) [1, 4, 7].

## Заключение

Развитие теорий анализа и синтеза информационных систем должно происходить в направлении более полного учета качества информации на всех трех уровнях: синтаксическом, семантическом и прагматическом. При описании информационных систем необходимо оперировать не только такими «привычными» понятиями как энтропия, количество информации, скорость передачи информации, пропускная способность и т.д. В условиях современного информационного общества с огромными информационными потоками объективно сложилась потребность в использовании таких не очень распространенных пока понятий, связанных с качеством и свойствами информации, как тезаурус, ценность, полезность, новизна, достаточность, полнота, старение, накопление, рассеяние и т.д.

В статье представлена относительно простая, но наглядная модель, позволяющая оценивать эффективность функционирования систем информационного обеспечения с учётом динамики ценности (полезности) передаваемой информации.

Реализация предложенного подхода в инженерных методиках позволит повысить качество и эффективность функционирования современных информационных систем за счёт повышения качества принимаемых решений на ранних стадиях жизненного цикла таких систем.

Максимально полный учет семантики и прагматики, а также динамических свойств обрабатываемой информации при анализе и синтезе систем информационного обеспечения позволит избежать дополнительных издержек (информационных рисков, ущерба) из-за необходимости пересмотра уже принятых и/или реализованных решений и необходимость проведения работ по внеплановой модернизации системы информационного обеспечения.

Дальнейшим развитием предложенного подхода может быть учет возможностей получателя по использованию поступающей информации и её влияния на решения стоящих задач. Существует необходимость совершенствования моделей и методов оценивания информационных рисков и ущерба в части учета семантики и прагматики перерабатываемой информации.

## Литература

1. Ефимов А. Н. Информация: ценность, старение, рассеяние. – М.: Знание, 1978. – 64 с.

2. Хромов Л. И. Информационная теория связи на пороге XXI века. – СПб.: ПиК, 1996. – 88 .

3. Смагин В. А., Парамонов И. Ю. Оценивание количества информационной работы вычислительной сети // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2012. № 12. С. 16–20.

4. Парамонов И. Ю. Влияние времени восстановления синхронизации на показатели устойчивости инфотелекоммуникационных сетей // Вопросы кибербезопасности. 2014. № 2(3). С. 61–66.

5. Вернер М. Основы кодирования. Учебник для вузов. – М.: Техносфера, 2006. – 288 с.

6. Харкевич А. А. Борьба с помехами. Изд. 3-е. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. – 280 с.

7. Додонов А. Г., Ландэ Д. В. Живучесть информационных систем. – Киев: Наукова дума, 2011. – 256 с.

8. Ушаков И. А. Эффективность функционирования сложных систем // Сб. О надёжности сложных технических систем. – М.: Сов. радио, 1966.

## References

1. Efimov A. N. *Informatsiia: tsennost', starenie, rasseianie* [Information: value, aging, scattering]. Moscow, Znanie Publ., 1978. 64 p. (in Russian).

2. Hromov L. I. *Informatsionnaia teoriia sviazi na poroge XXI veka* [The information theory of communication at the threshold of the XXI century]. Saint-Petersburg, PiK Publ., 1996. 88 p. (in Russian).

3. Smagin V. A., Paramonov I. Y. Ocenivanie kolichestva informacionnoj raboty vychislitel'noj seti. *Journal of Instrument Engineering*. 2012, no. 12, pp. 16-20 (in Russian).

4. Paramonov I. Y. Vlijanie vremeni vosstanovlenija sinhronizacii na pokazateli ustojchivosti infotelekommunikacionnyh setej. *Voprosy kiberbezopasnosti*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 61–66 (in Russian).

5. Verner M. *Osnovy kodirovanija* [The basics of coding]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2006. 288 p. (in Russian).

6. Harkevich A. A. *Bor'ba s pomehami* [The anti-interference]. Moscow, Knizhnyj dom «Librokom», 2009. 280 p. (in Russian).

7. Dodonov A. G., Landje D. V. Zhivuchest' informacionnyh system [Survivability of information systems]. Kiev, Naukova duma Publ., 2011. 256 p. (in Russian).

8. Ushakov I. A. Jeffektivnost' funkcionirovanija slozhnyh system [Efficiency of functioning of complex systems]. *O nadjozhnosti slozhnyh tehnicheskih system* [The reliability of complex technical systems], Moscow, Sov. radio Publ., 1966. (in Russian).

**Статья поступила 02 февраля 2016 г.**

## Информация об авторе

*Парамонов Иван Юрьевич* – кандидат технических наук. Докторант. Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского. Область научных интересов: системы связи и управления, информационное обеспечения, влияние качества информации на информационные процессы и управленческие решения. E-mail: ivan_paramonov@mail.ru

Адрес: 197198, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, д. 13.

---

# Model of the Accounting of Value and Aging of Information at Estimation of Efficiency of Functioning of Systems of Information Support

I. Y. Paramonov

***Purpose.*** *The increase in quantity of information streams strengthens the problems connected with need of improvement of systems of information support. At adoption of information and administrative decisions it is necessary to consider quality of the arriving information. Known theories not fully consider semantics and pragmatics of information and influence of quality of information on achievement of the objectives of functioning of information systems.* ***The purpose of work*** *is development of model which will allow to consider influence of quality of information on efficiency of functioning of systems.* ***Novelty:*** *unlike known the presented model considers information value, and also influence of aging of information on efficiency of functioning of systems of information support.* ***Methods.*** *The solution of the problem of increase of efficiency of information support is possible due to development of the theory of information, cybernetics and the accounting of semantics and pragmatics of information.* ***Result:*** *use of the offered model allows to receive estimates of "real" speed of information transfer and quantity and information work.* ***Practical importance:*** *the presented model can be used during the developing of engineering techniques of estimation of quality and efficiency of functioning of systems of information support.*

***Key words:*** *information support, information, semantics, pragmatics, value, usefulness, aging, information work.*

## Information about Author

*Ivan Yuryevich Paramonov* – Ph.D. of Engineering Sciences, Doctoral Candidate. A. F. Mozhaisky Military Space Academy. Field of research: communication systems and managements, information providing, influence of quality of information on information processes and administrative decisions. E-mail: ivan_paramonov@mail.ru

Address: Russia, Saint-Petersburg, Zhdanovskaya street, 13.

УДК 62–50:519.7/8

# Теоретические основы исследования интервальных функций методами интервально-дифференциального исчисления

Левин В. И.

***Актуальность.*** *Рассмотрены существующие подходы к расчету, анализу, синтезу и оптимизации систем в условиях неопределенности. Исследование неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками данных систем. Эти задачи значительно сложнее их детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с детерминированными (точно известными) параметрами. Усложнение связано с тем, что алгебра недетерминированных чисел сложнее алгебры детерминированных чисел.* ***Цель статьи.*** *В данной статье сформулирована и подробно описана задача вычисления и анализа поведения неполностью определенной функции, заданной с точностью до интервала значений.* ***Метод.*** *Для решения этой задачи предложен метод детерминизации, который позволяет свести задачу к двум аналогичным – для верхней и нижней граничных функций исходной неполностью определенной функции. В этом методе использован аппарат интервальной математики и интервально-дифференциального исчисления. Выделены различные типы возможного поведения интервальных функций (постоянство, возрастание, убывание, расширение, сужение) и различные типы экстремальных точек таких функций (например, точка максимума, точка минимума, точка максимального расширения, точка минимального расширения).* ***Новизна.*** *Доказаны теоремы, позволяющие определять участки различного поведения интервальных функций и точки с различными видами экстремума.* ***Результат****. Подробно рассмотрена и проиллюстрирована на примере работа предложенного алгоритма детерминизации, позволяющего анализировать поведение интервальных функций.*

***Ключевые слова:*** *оптимизация, неопределенность, детерминированная функция, интервальная функция, анализ поведения функций.*

## Введение

Современная наука и практика обработки информации хорошо справляется с задачами исследования различных систем с полностью определенными (детерминированными) параметрами. Эти задачи обычно формулируются как задачи расчета, анализа и синтеза тех или иных функций с детерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками изучаемых систем. Однако на практике часто встречаются другие системы – системы с неточно известными, т.е. неполностью определенными (недетерминированными) параметрами. Причины появления таких систем заключаются в естественной неопределенности, свойственной многим реальным процессам, происходящим в системах; в неточном задании параметров большинства систем из-за неизбежных погрешностей при их вычислении или измерении; в изменении во времени некоторых параметров систем; в необходимости совместного исследования целых семейств однотипных систем, имеющих одинаковые функции-характеристики и различающиеся лишь значениями параметров этих функций.

Исследование введенных неопределенных систем формулируется в виде задач расчета, анализа и синтеза различных функций с недетерминированными параметрами, служащих соответствующими характеристиками данных систем. Все эти задачи значительно сложнее их вышеупомянутых детерминированных аналогов, которые приходится решать при исследовании систем с полностью определенными (детерминированными) параметрами. Усложнение связано с тем, что алгебра недетерминированных чисел всегда сложнее алгебры детерминированных чисел.

В настоящей статье исследуются указанные более сложные задачи расчета и анализа неточно заданных (недетерминированных) функций интервального типа. В качестве математического аппарата используется интервальная алгебра и интервально-дифференциальное исчисление. Целью работы является устранение противоречия между требующими решения новыми сложными задачами и существующими подходами, не пригодными для их решения. Для этого разрабатываются новые, адекватные этим задачам модели и методы.

## 1. Постановка задачи

Рассмотрим обычную (детерминированную) функцию одной независимой переменной

$$y = f(x), \tag{1}$$

однозначно отображающую заданное множество $X = \{x\}$ независимых переменных $x$ в заданное множество $Y = \{y\}$ зависимых переменных $y$ в соответствии с некоторым законом $f$, который и называется функцией. Хорошо известно, что задача расчета (вычисления значений) функции (1) решается с помощью адекватного этой задаче математического аппарата алгебры вещественных чисел, при использовании подходящих методов вычисления, а задача анализа поведения функции (1) – с помощью адекватного ей аппарата классического дифференциального исчисления [1].

Теперь рассмотрим недетерминированную (именно, интервальную) функцию одной независимой переменной [2]

$$\tilde{y} = \tilde{f}(x), \tag{2}$$

однозначно отображающую заданное множество $X = \{x\}$ независимых вещественных (как и в случае (1)) переменных $x$ в заданное множество $\tilde{Y} = \{\tilde{y}\}$ зависимых переменных-интервалов $\tilde{y} = [y_1, y_2]$, в соответствии с законом $\tilde{f}$, который и называется интервальной функцией. Согласно определению (2), любую интервальную функцию $\tilde{f}$ можно представить в виде пары обычных функций $f_1, f_2$

$$\tilde{f} = \{f_1, f_2\}, \tag{3}$$

которые имеют вид

$$y_1 = f_1(x), \quad y_2 = f_2(x). \tag{4}$$

Из выражений (3), (4) видно, что интервальная функция $\tilde{f}$ эквивалентна паре обычных функций $f_1, f_2$, из которых первая однозначно отображает заданное множество $X=\{x\}$ независимых переменных $x$ функции $\tilde{f}$ в множество $Y_1=\{y_1\}$ нижних границ интервалов $\tilde{y}=[y_1,y_2]$ – зависимых переменных этой функции, а вторая однозначно отображает то же множество $X=\{x\}$ в множество $Y_2=\{y_2\}$ верхних границ тех же интервалов $\tilde{y}=[y_1,y_2]$ – зависимых переменных этой функции.

Задача настоящей работы заключается в построении двух систематических процедур (алгоритмов), связанных с изучением интервальных функций вида (2). А именно:

1. Процедура расчета (вычисления значений) интервальной функции.
2. Процедура анализа поведения интервальной функции.

В литературе хорошо изучена только задача вычисления интервальной функции, которая сводится к вычислению детерминированных нижней и верхней граничных функций интервальной функции [3, 4]. Задача анализа поведения интервальной функции изучена гораздо хуже, что связано с разнобоем в выборе критериев сравнения интервальных чисел [5, 6]. Реальные достижения здесь имеются лишь в нахождении точек оптимума интервальных функций [7]. В связи с этим, излагаемый в статье подход к вычислению и анализу поведения интервальной функции, основанный на математически строгом и едином методе детерминизации, т.е. сведение исследования интервальной функции к изучению ее верхней и нижней граничных функций, является весьма актуальным. Другие подходы к задаче изложены в [8, 9].

## 2. Решение задачи вычисления интервальной функции

Начнем с решения базовой задачи расчета (вычисления значений) интервальной функции. Здесь возможны два случая.

**Случай 1.** Интервальная функция задана в разделенном виде, в котором верхняя и нижняя границы интервального значения функции выражены каждая по отдельности. Этот вид представления интервальной функции вытекает из выражений (2)–(4). Именно, из (2), (3) следует явное представление интервальной функции в виде интервала

$$[y_1, y_2]=[f_1(x), f_2(x)], \tag{5}$$

границы которого согласно (5) выражаются формулами

$$y_1 = f_1(x), \quad y_2 = f_2(x). \tag{6}$$

Таким образом, вычисление интервального значения $\tilde{y}=[y_1,y_2]$ интервальной функции (2), соответствующего значению $x$ независимой переменной этой функции, осуществляется по следующему алгоритму.

**Шаг 1.** Записываем вычисляемую интервальную функцию типа (2) в разделенном виде (5), (6) с помощью нижней $f_1$ и верхней $f_2$ граничных функций функции (2).

**Шаг 2.** Вычисляем нижнюю граничную функцию $f_1$, используя для этого какой-либо подходящий известный метод вычисления обычных (детерминированных) функций [3].

**Шаг 3.** Вычисляем верхнюю граничную функцию $f_2$, используя ту же методику, что и на шаге 2.

**Шаг 4.** Соединяя вычисленные значения нижней $f_1$ и верхней $f_2$ граничных функций, получаем явное представление (5) вычисленной интервальной функции (2) в виде интервала.

**Случай 2.** Интервальная функция дана в неразделенном виде, т.е. в виде суперпозиции элементарных интервальных функций: интервального сложения и вычитания, умножения интервала на вещественное число, умножения и деления интервалов [4]. В этом случае перед собственно вычислением интервальная функция приводится к разделенному виду, после чего к функции применяется четырехшаговый алгоритм случая 1. Приведение любой интервальной функции к разделенному виду можно осуществить с помощью основных формул интервальной математики, выражающих результаты элементарных преобразований интервалов [4]

$$\begin{aligned}
&[a_1,a_2]+[b_1,b_2]=[a_1+b_1,a_2+b_2];\\
&[a_1,a_2]-[b_1,b_2]=[a_1-b_2,a_2-b_1];\\
&k\cdot[a_1,a_2]=\begin{cases}[ka_1,ka_2], & k>0,\\ [ka_2,ka_1], & k<0;\end{cases}\\
&[a_1,a_2]\cdot[b_1,b_2]=[\min_{i,j}(a_i\cdot b_j),\max_{i,j}(a_i\cdot b_j)];\\
&[a_1,a_2]/[b_1,b_2]=[a_1,a_2]\cdot[1/b_2,1/b_1],
\end{aligned}\tag{7}$$

при условии, что интервал $[b_1,b_2]$ не содержит нуля.

**Пример 1.** Привести к разделенному виду интервальную функцию

$$\tilde{y}=([2,3]x+[1,2]x)\cdot([5,7]x+[4,6]x)$$

в области $x\geq 0$.

*Решение.* Применяя к заданной интервальной функции последовательно третью, первую и четвертую формулы (7), получим нужный вид функции

$$\begin{aligned}
\tilde{y}=[y_1,y_2]&=([2x,3x]+[x,2x])\cdot([5x,7x]+[4x,6x])=[3x,5x]\cdot[9x,11x]=\\
&=[\min(3\cdot 9x^2,3\cdot 11x^2,5\cdot 9x^2,5\cdot 11x^2),\max(3\cdot 9x^2,3\cdot 11x^2,5\cdot 9x^2,5\cdot 11x^2)]=\\
&=[27x^2,55x^2].
\end{aligned}$$

Таким образом,

$$y_1=27x^2,\quad y_1=55x^2,$$

и наконец, разделенная форма заданной интервальной функции

$$\tilde{y}=[y_1,y_2]=[27x^2,55x^2].$$

## 3. Решение задачи анализа поведения интервальной функции: сравнение интервалов

Перейдем к описанию упомянутой ранее (п. 1) задачи анализа поведения интервальной функции. Постановка этой задачи аналогична постановке задачи

анализа поведения обычной детерминированной функции и включает, в первую очередь, отыскание

1) интервалов возрастания функции;
2) интервалов убывания функции;
3) интервалов постоянства значений функции;
4) точек максимума функции;
5) точек минимума функции.

Постановка задачи анализа поведения интервальной функции может еще включать отыскание особых интервалов (особых точек) интервальной функции. Существование таких интервалов (таких точек) связано с интервальным характером этой функции. У обычных детерминированных функций такие интервалы (точки) отсутствуют.

Очевидно, решение задач анализа поведения интервальной функции требует сравнения величин интервалов. В связи с этим ниже кратко изложены основные результаты теории сравнения интервалов [5, 6].

Рассмотрим два интервала $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$. Попытаемся сравнить величины этих интервалов, рассматривая их как интервальные числа. Прямое сравнение интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ на основе отношений отдельных пар вещественных чисел $(a_i,b_j)$, где $a_i \in \tilde{a}, b_j \in \tilde{b}$, не всегда возможно, так как в общем случае одни пары чисел будут находиться в отношении $(a_i > b_j)$, а другие – в противоположном отношении $(a_i < b_j)$. Поэтому остается реализовать сравнение интервалов на теоретико-множественном уровне, рассматривая каждый интервал их как единое целое, не делимое на части. При этом операции взятия максимума $\vee$ и минимума $\wedge$ двух интервалов $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$ можно ввести в виде следующих теоретико-множественных конструкций

$$\tilde{a} \vee \tilde{b} = \{a \vee b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}, \quad \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \{a \wedge b \mid a \in \tilde{a}, b \in \tilde{b}\}. \tag{8}$$

Таким образом, взятие максимума (минимума) двух интервалов $\tilde{a}, \tilde{b}$ определяется, согласно (8), как нахождение множества максимумов (минимумов) двух точных величин $a$ и $b$, при условии, что эти величины пробегают все возможные значения соответственно из интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$. Теперь для того, чтобы интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ можно было сравнить по величине, установив их отношение $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, нужно, чтобы 1) введенные операции $\vee, \wedge$ над этими интервалами существовали; 2) эти операции давали в результате один из операндов: $\tilde{a}$ или $\tilde{b}$; 3) эти операции были согласованы, т.е. если большим (меньшим) оказывается один из интервалов, то меньшим (большим) является другой из них. Сформулированное условие сравнимости величин интервалов является, очевидно необходимым и достаточным.

Нетрудно доказать, что условие согласованности операций $\vee, \wedge$ над интервалами всегда выполняется. Очевидно также, что эти операции существуют для любой пары интервалов $\tilde{a}, \tilde{b}$, причем результатом операции в общем случае оказывается некоторый новый интервал, отличный как от $\tilde{a}$, так и

от $\tilde{b}$. Таким образом, необходимым и достаточным условием сравнимости интервалов $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ оказывается условие, по которому операции $\tilde{a} \vee \tilde{b}$ и $\tilde{a} \wedge \tilde{b}$ должны иметь своим результатом один из интервалов – $\tilde{a}$ или $\tilde{b}$. Из этой формулировки условия сравнимости интервалов выводятся различные его конструктивные формы, удобные для практического применения. Эти формы содержатся в нижеследующих теоремах 1–4.

**Теорема 1.** Для того, чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$a_1 \geq b_1, \quad a_2 \geq b_2, \tag{9}$$

а для того, чтобы эти интервалы были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$a_1 \leq b_1, \quad a_2 \leq b_2. \tag{10}$$

Из теоремы видно, что интервалы $\tilde{a}, \tilde{b}$ сравнимы по величине (по отношению $\geq$ или $\leq$) и находятся в этом отношении только тогда, когда в таком же отношении находятся их одноименные границы $a_1, b_1$ и $a_2, b_2$.

Значение теоремы 1 в том, что она сводит сравнение интервалов и выбор большего (меньшего) из них к очевидной операции сравнения границ указанных интервалов, являющихся вещественными числами.

**Теорема 2.** Для того, чтобы два интервала $\tilde{a} = [a_1, a_2]$ и $\tilde{b} = [b_1, b_2]$ были несравнимы по величине (по отношению $\geq$ или $\leq$), т.е. не находились в отношении $\tilde{a} \geq \tilde{b}$ или $\tilde{a} \leq \tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1 < b_1, a_2 > b_2) \quad \text{или} \quad (b_1 < a_1, b_2 > a_2). \tag{11}$$

Интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ не сравнимы по отношениям $\geq, \leq$ только тогда, когда один из них полностью накрывает другой. Смысл предложения 2 в том, что оно выявляет существование случаев несравнимости интервалов по отношениям $\geq$ и $\leq$, в отличие от вещественных чисел, которые всегда сравнимы по этим отношениям. Несравнимость некоторых интервалов – естественный результат того, что интервальные числа, в отличие от обычных вещественных чисел, задаются не точно, а с неопределенностью (число принимает некоторое значение в заданном интервале, но при этом не уточняется, какое именно это значение).

Будем рассматривать теперь систему нескольких интервалов

$$\tilde{a}_1 = [a_{11}, a_{12}], \tilde{a}_2 = [a_{21}, a_{22}], \tilde{a}_3 = [a_{31}, a_{32}], \ldots \tag{12}$$

Сравнение по отношениям $\geq, \leq$ величин интервалов указанной системы (12), рассматриваемых как интервальные числа, реализуется в результате попарного сравнения указанных интервалов, выполняемого в соответствии с теоремами 1, 2. Главные результаты, получаемые этим путем, содержатся в нижеследующих теоремах 3 и 4.

**Теорема 3.** Для того, чтобы в системе нескольких интервалов (12) существовал максимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении $\geq$, и этим интервалом являлся $\tilde{a}_1$, необходимо и

достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\begin{matrix} a_{11} \geq a_{21},\ a_{11} \geq a_{31},\ a_{11} \geq a_{41},... \\ a_{12} \geq a_{22},\ a_{12} \geq a_{32},\ a_{12} \geq a_{42},... \end{matrix}. \quad (13)$$

**Теорема 4.** Для того, чтобы в системе нескольких интервалов (12) существовал минимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении $\leq$, и этим интервалом являлся $\tilde{a}_1$, необходимо и достаточно, чтобы границы рассматриваемого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов по условиям

$$\begin{matrix} a_{11} \leq a_{21},\ a_{11} \leq a_{31},\ a_{11} \leq a_{41},... \\ a_{12} \leq a_{22},\ a_{12} \leq a_{32},\ a_{12} \leq a_{42},... \end{matrix} \quad (14)$$

Как показывают теоремы 3, 4, интервал является максимальным (минимальным) в системе интервалов только тогда, когда максимальны (минимальны) его нижняя граница – среди нижних границ всех интервалов и его верхняя граница – среди верхних границ всех интервалов. Подобно случаю сравнения двух интервалов, сравнение любого числа интервалов системы не выявит максимального (минимального) интервала, если интервалы, входящие в систему, попарно не сравнимы.

До сих пор мы имели в виду процедуры выделения, вообще говоря, нестрого максимального (нестрого минимального) интервала, основанные на теоретико-множественных операциях (8) для вычисления нестрогого максимума (нестрогого минимума) двух интервалов. Аналогично этому вводятся процедуры выделения строго максимального (строго минимального) интервала, т.е. единственного интервала, являющегося максимальным (минимальным).

Будем считать совпадающие интервалы $\tilde{a},\tilde{b}$ равными по определению, т.е. для интервалов $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$, взятых произвольно, условие их равенства вводится таким образом:

$$(\tilde{a}=\tilde{b}) \Leftrightarrow (a_1=b_1, a_2=b_2). \quad (15)$$

Из формулы (15) следует, что неравными являются интервалы, удовлетворяющие условию

$$(\tilde{a} \neq \tilde{b}) \Leftrightarrow (a_1 \neq b_1 \text{ или } a_2 \neq b_2). \quad (16)$$

Теперь определение того, что некоторый интервал $\tilde{a}$ является строго максимальным из двух интервалов $\tilde{a},\tilde{b}$ можно записать в виде

$$(\tilde{a} > \tilde{b}) \Leftrightarrow (\tilde{a} \vee \tilde{b} = \tilde{a}, \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \tilde{b}, \tilde{a} \neq \tilde{b}), \quad (17)$$

аналогичным образом, определение того, что интервал $\tilde{a}$ является строго минимальным из двух интервалов $\tilde{a},\tilde{b}$ записывается в виде

$$(\tilde{a} < \tilde{b}) \Leftrightarrow (\tilde{a} \vee \tilde{b} = \tilde{b}, \tilde{a} \wedge \tilde{b} = \tilde{a}, \tilde{a} \neq \tilde{b}). \quad (18)$$

Здесь $\vee, \wedge$ – теоретико-множественные операции (8) вычисления максимума и минимума двух интервалов.

Из формулировки условий (17), (18) сравнимости интервалов как строгих неравенств между ними можно вывести различные конструктивные формы этих условий, удобные для практического применения. Эти формы содержатся в

следующих предложениях 5–8, которые подобны предложениям 1–4, дающим удобные конструктивные формы сравнимости интервалов в виде нестрогих неравенств.

**Теорема 5.** Для того, чтобы два интервала $\tilde{a}=[a_1,a_2],\tilde{b}=[b_1,b_2]$ были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a}>\tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1>b_1,\, a_2\ge b_2) \text{ или } (a_1\ge b_1,\, a_2>b_2), \tag{19}$$

а для того, чтобы эти интервалы были сравнимы по величине и находились в отношении $\tilde{a}<\tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1<b_1,\, a_2\le b_2) \text{ или } (a_1\le b_1,\, a_2<b_2). \tag{20}$$

Из данной теоремы вытекает, что интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ сравнимы по величине (по отношению $>$ или $<$) и находятся в указанном отношении только тогда, когда в том же отношении находятся их нижние границы $a_1,b_1$ (при этом верхние границы $a_2,b_2$ находятся в соответствующем нестрогом отношении – для $>$ это $\ge$, а для $<$ это $\le$) или их верхние границы $a_2,b_2$ (при этом нижние границы $a_1,b_1$ находятся в соответствующем нестрогом отношении).

**Теорема 6.** Для того, чтобы два интервала $\tilde{a}=[a_1,a_2]$ и $\tilde{b}=[b_1,b_2]$ были не сравнимы по величине (по отношению $>$ или $<$), т.е. не находились в отношении $\tilde{a}>\tilde{b}$ или $\tilde{a}<\tilde{b}$, необходимо и достаточно выполнения условий

$$(a_1<b_1,\, a_2>b_2) \text{ или } (b_1<a_1,\, b_2>a_2) \text{ или } (a_1=b_1,\, a_2=b_2). \tag{21}$$

Итак, интервалы $\tilde{a}$ и $\tilde{b}$ не сравнимы по отношениям $>,<$ только в тех случаях, когда один из них полностью «накрывает» другой либо когда интервалы равны между собой. Значение теоремы 6 в том, что она показывает существование случаев несравнимости интервалов по отношениям $>$ и $<$ даже тогда, когда сравниваемые интервалы не равны между собой, а только «накрывают» один другой. Эта ситуация существенно отличается от ситуации со сравнением вещественных чисел, где неравные числа всегда сравнимы по отношениям $>$ и $<$.

Рассмотрим теперь систему нескольких интервалов (12). Сравнение по отношениям $>$ и $<$ величин интервалов системы (12), рассматриваемых как интервальные числа, реализуется путем попарного сравнения этих интервалов, в соответствии с теоремами 5 и 6. Основные результаты, получаемые этим путем, изложены в нижеследующих теоремах 7, 8.

**Теорема 7.** Для того, чтобы в системе из нескольких интервалов (12) существовал максимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении $>$, и этим интервалом являлся $\tilde{a}_1$, необходимо и достаточно, чтобы границы этого интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left.\begin{array}{l}(a_{11}>a_{21},\, a_{12}\ge a_{22}) \text{ или } (a_{11}\ge a_{21},\, a_{12}>a_{22})\\ (a_{11}>a_{31},\, a_{12}\ge a_{32}) \text{ или } (a_{11}\ge a_{31},\, a_{12}>a_{32})\\ (a_{11}>a_{41},\, a_{12}\ge a_{42}) \text{ или } (a_{11}\ge a_{41},\, a_{12}>a_{42})\\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\end{array}\right\}. \tag{22}$$

**Теорема 8.** Для того, чтобы в системе из нескольких интервалов (12) существовал минимальный интервал, который находится со всеми остальными интервалами в отношении $<$, и этим интервалом являлся $\tilde{a}_1$, необходимо и достаточно, чтобы границы данного интервала были расположены относительно одноименных границ всех остальных интервалов согласно условиям

$$\left.\begin{array}{l}(a_{11} < a_{21}, a_{12} \le a_{22}) \text{ или } (a_{11} \le a_{21}, a_{12} < a_{22}) \\ (a_{11} < a_{31}, a_{12} \le a_{32}) \text{ или } (a_{11} \le a_{31}, a_{12}, < a_{32}) \\ (a_{11} < a_{41}, a_{12} \le a_{42}) \text{ или } (a_{11} \le a_{41}, a_{12} < a_{42}) \\ \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\end{array}\right\}. \qquad (22)$$

## 4. Решение задачи анализа поведения интервальной функции. Основные теоремы и алгоритм

В предыдущем пункте мы изложили вспомогательный для задачи анализа поведения интервальной функции материал, связанный со сравнением интервальных величин. Теперь мы займемся собственно анализом поведения интервальных функций.

Рассмотрим произвольную интервальную функцию (2). Предположим, эта функция задана в разделенном виде (5), (6). Это не ограничивает общности рассмотрения, так как функция, заданная в неразделенном виде, всегда может быть приведена к разделенному виду (см. п. 3). Будем также считать, что нижняя и верхняя граничные функции нашей интервальной функции непрерывны и дифференцируемы. Сформулируем условия, при которых заданная функция возрастает, убывает, остается постоянной, достигает максимума (минимума), ведет себя иным, отличным от указанных, способом.

По аналогии с обычными (детерминированными) функциями [1] введем понятия возрастания, убывания, постоянства, максимума и минимума интервальной функции.

**Определение 1.** Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется возрастающей на интервале $(a,b)$, если для любых $x_1$ и $x_2$ из данного интервала, для которых $x_1 < x_2$, выполняется неравенство $\tilde{f}(x_1) < \tilde{f}(x_2)$.

**Определение 2.** Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется убывающей на интервале $(a,b)$, если для любых $x_1$ и $x_2$ из данного интервала, для которых $x_1 < x_2$, выполняется неравенство $\tilde{f}(x_1) > \tilde{f}(x_2)$.

**Определение 3.** Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ является постоянной на интервале $(a,b)$, если для любых $x_1$ и $x_2$ из упомянутого интервала, для которых $x_1 < x_2$, выполняется неравенство $\tilde{f}(x_1) = \tilde{f}(x_2)$.

**Определение 4.** Точка $x = x_0$ называется точкой максимума интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $\tilde{f}(x_0)$ – максимумом указанной функции, если для всех точек $x$ из некоторой окрестности точки $x_0$, не совпадающих с $x_0$, истинно строгое неравенство $\tilde{f}(x_0) > \tilde{f}(x)$.

**Определение 5.** Точка $x = x_0$ называется точкой минимума интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $\tilde{f}(x_0)$ минимумом этой функции, если для всех точек $x$ из некоторой окрестности точки $x_0$, не совпадающих с $x_0$, выполняется строгое неравенство $\tilde{f}(x_0) < \tilde{f}(x)$.

Введем теперь понятия расширения и сужения интервальной функции, которые не применимы к обычным (детерминированным) функциям.

**Определение 6.** Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется расширяющейся на интервале $(a,b)$, если для любых точек $x_1$ и $x_2$ из этого интервала, для которых $x_1 < x_2$, интервал $\tilde{f}(x_2)$ полностью накрывает интервал $\tilde{f}(x_1)$.

**Определение 7.** Интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ называется сужающейся на интервале $(a,b)$, если для любых $x_1$ и $x_2$ из указанного интервала, для которых $x_1 < x_2$, интервал $\tilde{f}(x_1)$ полностью накрывает интервал $\tilde{f}(x_2)$.

**Определение 8.** Точка $x = x_0$ называется точкой максимального расширения интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $D(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$ – максимальной шириной указанной функции, если для всех точек $x$ из некоторой окрестности точки $x_0$, не совпадающих с $x_0$, интервал $\tilde{f}(x_0)$ полностью «накрывает» интервал $\tilde{f}(x)$.

**Определение 9.** Точку $x = x_0$ будем называть точкой максимального сужения интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $d(x_0) = f_2(x_0) - f_1(x_0)$ – минимальной шириной функции $\tilde{f}(x)$, если для всех точек $x$ некоторой окрестности точки $x_0$, не совпадающих с $x_0$, интервал $\tilde{f}(x)$ полностью накрывает $\tilde{f}(x_0)$.

Сформулируем и докажем условия, которые определяют то или иное поведение интервальной функции.

**Теорема 9.** Для того, чтобы интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ была возрастающей на интервале $(a,b)$, необходимо и достаточно, чтобы на указанном интервале ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ была возрастающей, а верхняя граничная функция $f_2(x)$ – неубывающей либо, наоборот, функция $f_2(x)$ была возрастающей, а функция $f_2(x)$ – неубывающей.

*Доказательство.* Представим функцию $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ в интервальной форме (5): $\tilde{y} = [f_1(x), f_2(x)]$. Возрастание этой функции на интервале $(a,b)$ согласно определению (1) означает, что для любых $x_1, x_2$ из этого интервала, таких, что $x_1 < x_2$, выполняется неравенство $[f_1(x_1), f_2(x_1)] < [f_1(x_2), f_2(x_2)]$, которое, согласно теореме 5, приводит к двум возможным вариантам:

$$f_1(x_1) < f_1(x_2),\ f_2(x_1) \le f_2(x_2) \text{ или } f_1(x_1) \le f_1(x_2),\ f_2(x_1) < f_2(x_2).$$

Итак, верно одно из двух: либо на интервале $(a,b)$ нижняя граничная функция $f_1(x)$ интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ всюду является возрастающей, а ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ – неубывающей либо наоборот, $f_2(x)$ является возрастающей, а $f_1(x)$ – неубывающей, что и требовалось доказать.

**Теорема 10.** Для того, чтобы интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ была убывающей на интервале $(a,b)$, необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ убывала, а верхняя граничная функция $f_2(x)$ – не возрастала либо, наоборот, функция $f_2(x)$ была убывающей, а функция $f_1(x)$ – невозрастающей.

*Доказательство* аналогично доказательству теоремы 9, однако использует определение 2 вместо определения 1.

**Теорема 11.** Для того, чтобы интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ была постоянной на интервале $(a,b)$, необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале ее нижняя $f_1(x)$ и верхняя $f_2(x)$ граничные функции были постоянными.

*Доказательство* следует прямо из определения интервала как множества всех вещественных чисел между заданными двумя числами – границами интервала, включая и сами эти границы.

**Теорема 12.** Для того, чтобы точка $x = x_0$ была точкой максимума интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $\tilde{f}(x_0)$ – максимумом этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в этой точке достигала максимума ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ и не достигала минимума ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ или достигала максимума ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ и не достигала минимума ее нижняя граничная функция $f_1(x)$.

*Доказательство.* Представим функцию $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ в интервальной форме (5): $\tilde{y} = [f_1(x), f_2(x)]$. Существование максимума этой функции в точке $x = x_0$ по определению 4 означает, что для всех точек $x$ из некоторой окрестности точки $x_0$, не совпадающих с $x_0$, выполняется неравенство $\tilde{f}(x_0) > \tilde{f}(x)$ или, в интервальной форме $[f_1(x_0), f_2(x_0)] > [f_1(x), f_2(x)]$. Последнее неравенство, согласно теореме 5, эквивалентно условию

$$(f_1(x_0) > f_1(x),\ f_2(x_0) \geq f_2(x)) \text{ или } (f_1(x_0) \geq f_1(x),\ f_2(x_0) > f_2(x)).$$

Условия левой скобки показывают, что в точке $x_0$ функция $f_1(x)$ обращается в максимум, а функция $f_2(x)$ не обращается в минимум. Условия же правой скобки показывают, что в точке $x_0$ функция $f_2(x)$ обращается в максимум, а функция $f_1(x)$ не обращается в минимум. Что и требовалось доказать.

**Теорема 13.** Для того, чтобы точка $x = x_0$ являлась точкой минимума интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а число $\tilde{f}(x_0)$ являлось ее минимумом, необходимо и достаточно, чтобы в этой точке достигала минимума ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ и не достигала максимума ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ или, наоборот, достигала минимума верхняя граничная функция $f_2(x)$ и не достигала максимума нижняя граничная функция $f_1(x)$.

*Доказательство* теоремы 13 аналогично доказательству теоремы 12, но привлекает определение 5.

**Теорема 14.** Для того, чтобы интервальная функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ была расширяющейся на интервале $(a,b)$, необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале была убывающей ее нижняя граничная функция $f_1(x)$ и была возрастающей ее верхняя граничная функция $f_2(x)$.

*Доказательство.* Для любых $x_1, x_2$ из интервала $(a,b)$, таких, что $x_1<x_2$, в силу расширения функции $f$ на этом интервале должно выполняться такое условие: интервал $\tilde{f}(x_2)$ полностью накрывает интервал $\tilde{f}(x_1)$. Выражая эти интервалы явно в интервальной форме $\tilde{f}(x_1)=[f_1(x_1), f_2(x_1)], \tilde{f}(x_2)=[f_1(x_2), f_2(x_2)]$, будем иметь условие накрытия интервалов:

$$f_1(x_2)<f_1(x_1), \quad f_2(x_2)>f_2(x_1).$$

Первое неравенство показывает, что функция $f_1(x)$ является убывающей, второе – что $f_2(x)$ является возрастающей. Что и требовалось доказать.

**Теорема 15.** Для того, чтобы интервальная функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ была сужающейся на интервале $(a,b)$, необходимо и достаточно, чтобы на этом интервале была убывающей ее верхняя граничная функция $f_2(x)$ и была возрастающей ее нижняя граничная функция $f_1(x)$.

*Доказательство* аналогично доказательству теоремы 14.

**Теорема 16.** Для того, чтобы точка $x=x_0$ была точкой максимального расширения интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, а число $D(x_0)=f_2(x_0)-f_1(x_0)$ максимальной шириной этой функции, необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности точки $x_0$ слева функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ была расширяющейся, а в некоторой окрестности точки $x_0$ справа она была сужающейся.

**Теорема 17.** Для того чтобы точка $x=x_0$ была точкой максимального сужения интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, а число $d(x_0)=f_2(x_0)-f_1(x_0)$ минимальной шириной указанной функции, необходимо и достаточно, чтобы в некоторой окрестности точки $x_0$ слева функция $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$ была сужающейся, а в некоторой окрестности точки $x_0$ справа она была расширяющейся.

*Доказательства* теорем 16, 17 следуют прямо из определений 8, 9 точек максимального расширения и сужения интервальной функции.

Анализ поведения интервальной функции $\tilde{y}=\tilde{f}(x)$, как показывает изложенный в этом параграфе материал, всегда сводится к анализу поведения двух обычных детерминированных функций: нижней $f_1(x)$ и верхней $f_2(x)$ граничных функций функции $\tilde{f}(x)$. Это позволяет использовать для анализа поведения интервальных функций хорошо известные и разработанные методы анализа поведения обычных (детерминированных) функций, основанные на использовании классического дифференциального исчисления [1]. При этом алгоритм анализа поведения произвольной интервальной функции может быть описан следующим образом.

**Шаг 1**. Проверка формы, в которой задана исходная интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, подлежащая анализу. Если эта форма неразделенная, т.е. не имеющая вида интервала $\tilde{y} = [y_1, y_2] = [f_1(x), f_2(x)]$, где $y_1 = f_1(x)$ и $y_2 = f_2(x)$ – соответственно нижняя и верхняя граничные функции заданной интервальной функции, то переход к шагу 2. Если она разделенная, т.е. имеющая указанный вид, то переход к шагу 3.

**Шаг 2.** Приведение функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ из неразделенного вида к разделенному с помощью базовых формул интервальной алгебры (7) (пример 1).

**Шаг 3.** Анализ поведения нижней граничной функции $y_1 = f_1(x)$ интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ с помощью известных методов анализа поведения обычных (детерминированных) функций, на основе классического дифференциального исчисления. В ходе этого анализа устанавливаем интервалы возрастания и убывания функции $f_1$, а также точки ее максимумов и минимумов.

**Шаг 4.** Анализ поведения верхней граничной функции $y_2 = f_2(x)$ нашей интервальной функции. Он выполняется теми же методами и по той же программе, что и предыдущий шаг.

**Шаг 5.** Составление сводной таблицы поведения обеих граничных функций $y_1 = f_1(x), y_2 = f_2(x)$ (табл. 1) путем заполнения в ней первых 3 строк, в соответствии с результатом анализа поведения функций $f_1(x), f_2(x)$ (шаги 3, 4).

Таблица 1 – Сводная таблица поведения функций

| $x$ | $(-\infty, x_1)$ | $x_1$ | $(x_1, x_2)$ | $x_2$ | $(x_2, x_3)$ | $x_3$ | $(x_3, x_4)$ | … | $(x_{n-1}, x_n)$ | $x_n$ | $(x_n, \infty)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $y_1 = f_1(x)$ | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная | … | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная |
| $y_2 = f_2(x)$ | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная | … | монотонная | возможный экстремум $f_1$ или $f_2$ | монотонная |
| $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ | возрастание | максимум | убывание | минимум | расширение | максимальное расширение | сужение | … | сужение | максимальное сужение | расширение |

**Шаг 6.** Анализ этой таблицы с помощью теорем 9–15, позволяющих идентифицировать последовательные интервалы $(-\infty, x_1), (x_1, x_2), ..., (x_{n-1}, x_n), (x_n, \infty)$ в ней как интервалы возрастания, убывания, расширения или сужения анализируемой интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$, а промежуточные точки $x_1, x_2, ..., x_n$ между интервалами как точки максимума (минимума) функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ или точки максимума (минимума) ее расширения или сужения. Например, если на некотором интервале $(x_i, x_{i+1})$ функция $f_2(x)$ возрастает, а на соседнем интервале $(x_{i+1}, x_{i+2})$ она убывает, так что в точке $x_{i+1}$ она максимальна, и при этом функция $f_1(x)$ на обоих интервалах постоянная, то согласно теоремам 9, 10, 12 интервальная функция $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ на интервале $(x_i, x_{i+1})$ возрастает, в точке $x_{i+1}$ достигает максимума, затем на интервале $(x_{i+1}, x_{i+2})$ убывает.

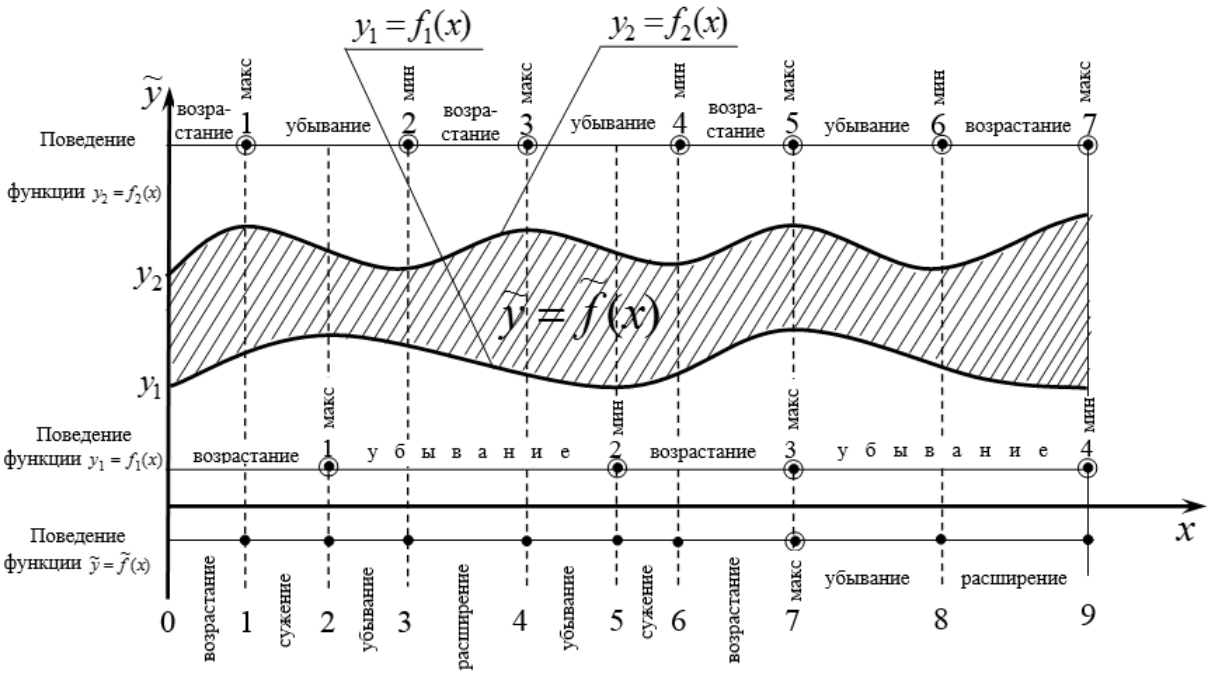



Рис. 1. График интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$

После выполнения шага 6 заполняют четвертую строку сводной таблицы поведения и на этом анализ поведения заданной интервальной функции заканчивается. Характерный возможный вид четвертой строки сводной таблицы поведения интервальной функции показан в табл. 1. По результатам анализа можно вычертить график интервальной функции $\tilde{y} = \tilde{f}(x)$ (см. рис. 1).

## Заключение

В настоящей статье разработаны систематические методы решения задач расчета и анализа поведения недетерминированных функций интервального типа, в которых функции определяются с точностью до интервала возможных значений. В качестве математического аппарата использованы интервальная алгебра и дифференциальные характеристики верхней и нижней границ изучаемых интервальных функций, которые можно рассматривать как

специальное дифференциальное исчисление для неточно задаваемых функций интервального типа. Использование разработанных методов и математического аппарата позволило достичь поставленной в работе цели – устранение противоречия между новыми сложными задачами и существующими, не пригодными для их решения подходами.

## Литература

1. Фихтенгольц Г. М. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. – М.: Физматлит, 2001.

2. Левин В. И. Интервальная производная и начала недетерминистского дифференциального исчисления // Онтология проектирования. 2012. № 4.

3. Милн В. Э. Численный анализ. – М.: Издательство иностранной литературы, 1980.

4. Алефельд Г., Херцбергер Ю. Введение в интервальные вычисления. – М: Мир, 1987.

5. Левин В. И. Интервальные методы оптимизации систем в условиях неопределенности. – Пенза: Изд-во Пензенского технолог. ин-та, 1999. – 101 с.

6. Левин В. И. Оптимизация в условиях интервальной неопределенности. Метод детерминизации // Автоматика и вычислительная техника. 2012. № 4.

7. Левин В. И. Оптимизация в условиях неопределенности методом детерминизации // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. 2015. № 4 (35).

8. Вересников Г. С. Оптимизация с неопределенными параметрами // Управление развитием крупномасштабных систем. Материалы восьмой международной конференции. – М.: ИПУ РАН. Т.1. – 2015.

9. Гасанов И. И., Ерешко Ф. И. Модели неопределенности при управлении на финансовых рынках // Управление развитием крупномасштабных систем. Материалы восьмой международной конференции. – М.: ИПУ РАН. Т.1. – 2015.

## References

1. Fihtengolc G. M. *Kurs differencialnogo i integralnogo ischisleniya* [Course of Differential and Integral Calculus]. Vol. 1. – M.: Fizmatlit, 2001. (in Russian).

2. Levin V. I. *Intervalnaya proizvodnaya i nachala nedeterministskogo differencialnogo ischisleniya* [Interval Derivative and Nondeterministic Differential Calculus] // Ontologiya proektirovaniya. – 2012. – № 4. (in Russian).

3. Milne W. E. *Numerical Calculus*. Princeton, University Press, 1949. – 393 p.

4. Alefeld G., Herzberger Ju., *Einführung in die Intervallrechnung* [Introduction to the Interval Computations]. Zürich, B.I.-Wissenschaftsverlag, 1974, 398 p. (in German).

5. Levin V. I. *Intervalnye metody optimizacii sistem v usloviyah neopredelennosti* [Interval Methods of System Optimization in Condition of Uncertainty]. Penza, Penza State Technological Institute Publ., 1999. – 101 p. (in Russian).

6. Levin V. I. Optimization in Terms of Interval Uncertainty. The Determination Method. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2012, vol. 46, no. 4, pp. 157-163.

7. Levin V. I. Optimization in Condition of Uncertainty with Determination Method. *Radio Electronics. Computer Science. Control*, 2015, no.3. (in Russian).

8. Veresnikov G. S. Optimization with indefinite parameters. *Managing the development of large-scale systems. Proceedings of the eighth international conference*. Moscow, IC RAS, 2015, Vol. 1. (in Russian).

9. Gasanov I. I., Ereshko F. I. Models of uncertainty in the management of the financial markets. *Managing the development of large-scale systems. Proceedings of the eighth international conference*. Moscow, IC RAS, 2015, Vol. 1. (in Russian).

## Информация об авторах

*Левин Виталий Ильич* – доктор технических наук, профессор, PhD, Full Professor. Заслуженный деятель науки РФ. Пензенский государственный технологический университет. Область научных интересов: логика; математическое моделирование в технике, экономике, социологии, истории; принятие решений; оптимизация; теория автоматов; теория надежности; распознавание; история науки; проблемы образования. E-mail: vilevin@mail.ru

Адрес: 440039, Россия, г. Пенза, пр. Байдукова/ул. Гагарина, д. 1а/11.

---

## Analysis of Interval Functions by Methods of Interval Differential Calculus

V. I. Levin

***Relevance.*** *The existing approaches to the calculation, analysis, synthesis and optimization of systems in conditions of uncertainty. The studying of uncertain systems is formulated in the form of tasks of calculation, analysis and synthesis of various nondeterministic functions with parameters that serve as the respective characteristics of these systems. These problems are much more difficult their deterministic counterparts which should be solved in the study of systems with deterministic (exactly known) parameters. Complication is due to the fact that the algebra of undetermined numbers more complicated than algebra of deterministic numbers.* ***The purpose.*** *This article is formulated and described in detail the problem of calculating and analyzing the behavior of a particular function which is not fully given (only up to a range of values).* ***Method.*** *To solve this problem there is provided a method of determination, which reduces the problem to the two same – for the upper and lower boundary functions of the original incompletely defined function. In this method we use the apparatus of interval mathematics and interval-differential calculus. We distinguish different types of possible behavior of interval functions (consistency, increase, decrease, expansion, restriction) and various types of extreme points of functions (on a sample, the maximum point, a minimum point, the point of maximum extension, the minimum extension point).* ***Novelty.*** *Theorems for defining the areas of the different behavior of interval functions and terms with various kinds of extreme are proved.* ***Result****. We considered in detail and illustrated by example the work of the proposed algorithm of determination for analyzing the behavior of interval functions.*

***Keywords:*** *optimization, uncertainty, exactly determined function, interval function, analysis of behavior of interval functions.*

## Information about Author

*Vitaly Ilich Levin* – Doctor of Technical Sciences, Full Professor. Honoured Scientist of Russia. Penza State Technological University. Field of Research: logic; mathematical modeling in technics, economics, sociology, history; decision making, optimization, recognition, automata theory, reliability theory, history of science, problems of education. E-mail: vilevin@mail.ru

Address: Russia, 440039, Penza, pr. Baydukova/ Gagarin st., 1a/11.